



Universidad Politécnica de Cataluña
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
UPC - ETSAB

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural:
Evaluación de fiabilidad de los parámetros perceptivos y de confort.

Trabajo de Fin de Máster - TFM

Presentado al Departamento de Construcciones Arquitectónicas
Universidad Politécnica de Cataluña,
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
Para la obtención del Título de:

Máster Oficial Universitario
Tecnología en La Arquitectura
Línea de especialización
Construcción e Innovación Tecnológica

Presentado por:
Laura Mariel Sosa Domínguez

Director:
Dr. Arq. Adrián Muros i Alcojor

Barcelona, España
21 de Octubre del 2016

*"Todos los Derechos Reservados.
La publicación parcial o total
del presente documento debe
responder a autorización expresa
de sus autores y de la Universidad
Politécnica de Cataluña, por
condición de copropiedad."*

*"Las opiniones y consideraciones
emitidas en el presente trabajo
de investigación son de exclusiva
responsabilidad de sus autores,
eximiéndose la Universidad
Politécnica de Cataluña
de responsabilidad por las
consecuencias, daños o perjuicios
que tales juicios de valor pudieran
ocasionar a terceras personas o
instituciones."*

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecer al profesor Dr. Arq. Adrián Muros i Alcojor, quien ha sido mi director en esta investigación y ha orientado su desarrollo. Generosamente me ha brindado su apoyo y recomendaciones a lo largo del trabajo, las cuales han resultado fundamentales para su realización.

A mi pareja Diego Velázquez, a mis Padres, a mis hermanos y a mis amigos cercanos por su gran apoyo durante todo el proceso de finalización de esta etapa.

1.

Introducción

Pág. 6

1.1 Objetivos

1.2 Metodología

2.

Fundamentos Teóricos

Pág. 10

2.1 La luz natural

2.2 Características

2.3 Fuentes de iluminación

2.4 Comportamiento de la luz

2.5 La percepción visual

3.

Luz artificial

Pág. 34

3.1 Tipos de iluminación artificial

3.2 Conceptos básicos

3.3 Confort visual

4.

Tecnología avanzada de Simulación

Pág. 46

4.1 Iluminación biodinámica

4.2 Ilusiones visuales

4.3 Conclusiones teóricas

5.

Métodos experimentales de simulación

Pág. 78

5.1 Fase de experimentación

5.2 Descripción de experimento

5.3 Encuestas

5.4 Resultados

5.5 Discusión de resultados

5.6 Futuras investigaciones

6.

Conclusiones

Pág. 98

6.1 Generales

6.2 Referencias Bibliográficas

6.3 Anexos



1

Introducción

1.1 Objetivos

1.2 Metodología

Introducción



*Imagen 1: Instalación Coelux, simulación de luz natural. CoeLux® 45 HC
Foto: Ekspobalta*

La calidad de la iluminación artificial es una gran preocupación en el mundo actual, donde la estructura de los espacios de trabajo, centros comerciales, centros deportivos y comunitarios, estaciones de trenes y aeropuertos, etc. nos limitan a perdurar más tiempo sin fuentes de luz natural. En muchos casos los espacios habitables no permiten la presencia de ventanas o lucernarios, lo cual le permitiría a los usuarios disfrutar del confort derivado del contacto visual con el ambiente exterior.

Cuando sólo está presente la luz artificial, el espacio se siente como un hueco aislado, desconectado de los ritmos naturales y no responde a la demanda básica humana de tener una relación con la luz producida por el Sol. El problema es particularmente relevante en las regiones norte y sur del planeta, donde la iluminación natural es insuficiente una gran parte del año.

Es especialmente relevante en aquellas áreas caracterizadas por las no tan favorables condiciones climáticas, donde la construcción de espacios habitables subterráneos se está volviendo cada vez más frecuente para poder satisfacer los requerimientos de ahorro de energía. La situación está destinada a convertirse aún más dramática en el futuro próximo y esto incluye una iniciativa en la búsqueda de innovaciones en las fuentes de iluminación artificial.



Imagen 2: Instalación para el lanzamiento de la tecnología CoeLux® 45 HC, Union Halle. Recreación de una entrada de luz en Santorini en una tarde soleada de primavera. Foto: Michael Loos

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

Los espacios iluminados artificialmente a menudo se convierten en fríos e impersonales cuando las ventanas se convierten en espejos y se obtiene una sensación de estar aislado de su entorno. Nos surge el interés de comprobar si es realmente posible representar la luz natural de manera artificial y si esta simulación convence realmente a la mente y al ojo humano.

El propósito de este trabajo de investigación es explorar si hay una manera de simular artificialmente un ambiente de luz natural, en espacios que no tienen acceso a ella. Nos concentramos en analizar los parámetros perceptivos de confort lumínico del espacio interior tanto bajo condiciones naturales como en condiciones artificiales de luz. Nos limitamos a realizar un trabajo de investigación, realizando un experimento menor de comparación basado en encuestas a un grupo seleccionado de estudiantes en un aula de la escuela.

1.1. Objetivos

1. Proporcionar una visión general de las tecnologías artificiales de simulación de iluminación natural.
2. Analizar los parámetros perceptivos de confort lumínico del espacio interior bajo condiciones naturales y artificiales de iluminación.
3. Evaluar y comparar un espacio iluminado artificialmente con luz biodinámica y de forma natural a través de encuestas sobre la reacción de los usuarios.

1.2. Metodología a utilizar

El esquema de investigación a seguir constará de cuatro partes:

1. Primera Parte:

- Introducción al tema y marco teórico de investigación.

Se analizan los antecedentes de la iluminación natural y artificial.

2. Segunda Parte:

- Análisis de casos

Estudio sobre las tecnologías de simulación de luz natural actuales.

3. Tercera Parte:

- Estudio experimental

Realización de un modelo de simulación experimental con dos fuentes de luz: luz natural a través de conductos solares y de luz artificial a través de lámparas biodinámicas. Se comparan mediciones de las calidades ambientales de ambos escenarios por medio de encuestas a los usuarios.

Se realiza un análisis comparativo a partir de los datos obtenidos a través de las encuestas realizadas.

4. Cuarta Parte

- Resultados y discusiones

Conclusiones generales y particulares del trabajo realizado.



2

Fundamentos Teóricos

2.1 La luz natural

2.2 Características

2.3 Fuentes de iluminación

2.4 Comportamiento de la luz

2.5 La percepción visual

Fundamentos Teóricos**2.1 La luz natural**

El primer capítulo presenta un análisis sobre los conceptos básicos de iluminación natural. Para obtener una mejor comprensión sobre las medidas a tomar en el intento de simular los efectos positivos de la luz del día, primero es importante entender cómo la luz natural influye sobre el espacio interior.

La luz natural es una fuente luminosa muy eficiente que cubre todo el espectro visible, que proporciona un rendimiento de colores perfecto, con variaciones de intensidad, color y distribución de luminancias, con una dirección variable de la mayor parte de la luz incidente.

Millet (1996) nos explica que nuestra capacidad para visualizar los objetos en el espacio está determinada completamente por la luz. Lo que percibimos a través de nuestra vista es la luz reflejada por las superficies de los objetos de acuerdo a sus características materiales; es decir, la luz interactuando con los objetos. Si no hay luz es imposible percibir visualmente cualquier objeto.

Desde el punto de vista de la física, la luz es considerada como una parte de la energía radiante que el ojo es capaz de detectar. Es decir, aquella

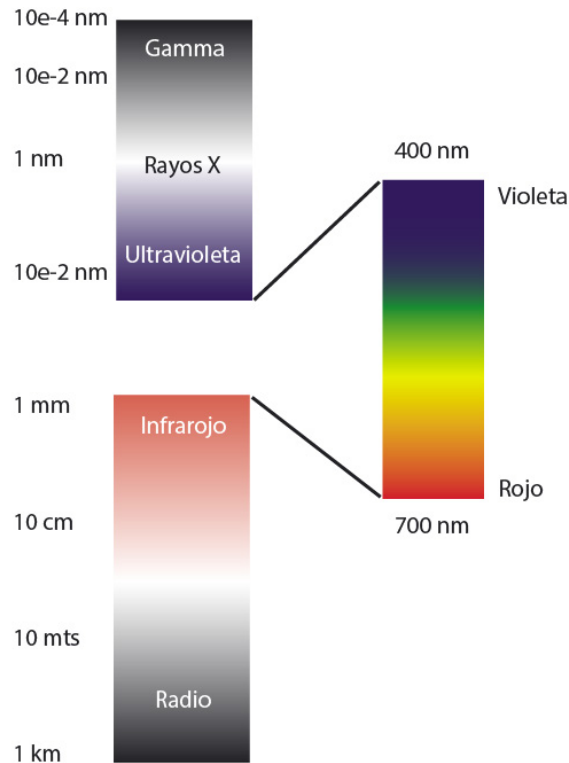


Imagen 3: Espectro de radiación electromagnética y espectro visible por el ojo humano.

Fuente: Comité Español de Iluminación

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

energía que se emite o transporta en forma de ondas electromagnéticas y que son captadas por el ojo humano. Esta energía radiante o radiación, está constantemente presente en el universo y procede del sol y las estrellas (De las Casas, González y Puente, 1991).

La luz visible es una región del espectro electromagnético cuyas ondas electromagnéticas tienen una longitud de onda que va desde el rojo (780 nm), al violeta (380 nm). Esta pequeña región del espectro es la energía que percibe el ojo humano y nos permite ver los objetos: el espectro visible. Para Major, Speirs y Tischhauser (2005) cuando diseñamos el ambiente construido, el sol es la fuente lumínica más importante a considerar. La luz que él emite, a la cual nos referimos como natural, no solo nos permite ver sino que también determina el diseño, orientación, forma y materialidad de los edificios y el paisaje.

Para Millet (1996), la luz natural es un elemento muy importante en la concepción de un espacio arquitectónico, ya que ésta no solo permite iluminar los espacios interiores, sino que a través de un manejo adecuado de las formas arquitectónicas, los materiales y las aberturas, es posible darle carácter al espacio, convirtiéndose así en un elemento más de composición que le otorga al espacio movilidad y variabilidad.

Es por esto que se hace necesario entonces entender su fenomenología, sus características, sus componentes y la manera como todas estas

características influyen en la calidad de la iluminación natural y su capacidad para transformar la percepción visual del espacio.

La disponibilidad y características de la luz natural dependen de la latitud, meteorología, época del año y del momento del día. La cantidad de luz natural recibida en la tierra varía con la situación, la proximidad a las costas o tierra adentro. El clima y la calidad del aire también afectan a la intensidad y duración de la luz natural. De ahí que según los climas, la luz natural pueda ser predecible o muy impredecible.

Usar la luz natural como fuente de iluminación de tareas en el entorno de trabajo o incluso en el interior de viviendas requiere medidas especiales para manejar esta fuente cambiante dinámicamente. Generalmente las variaciones continuas en la disponibilidad de luz natural requieren dispositivos de apantallamiento adaptables y sistemas de alumbrado eléctrico para mantener las relaciones y variaciones de luminancia en el interior dentro de límites aceptables.

Por la noche, o incluso durante el día en inviernos oscuros, el alumbrado artificial debe ser capaz de aportar el nivel de iluminación necesario para poder realizar la tarea visual. En aquellos casos en que la luz natural proporcione una distribución insuficiente o incorrecta para la realización de una tarea, se empleará el alumbrado eléctrico como fuente adicional de luz.

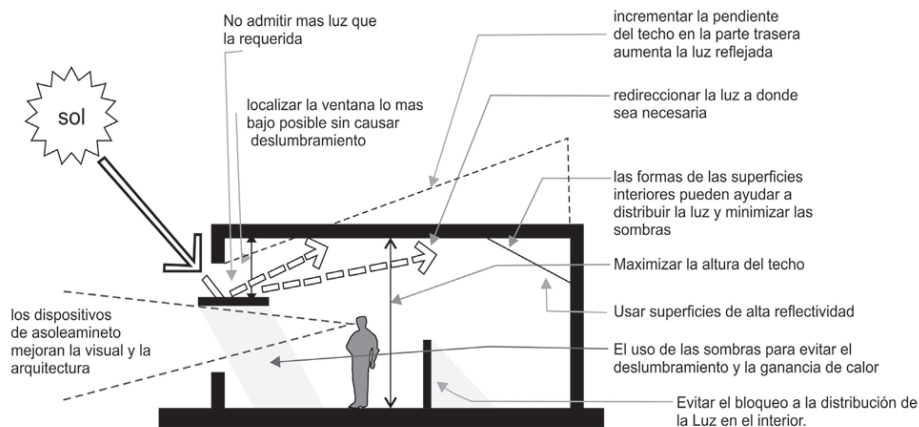


Imagen 4: Gráfico de estrategias para el uso eficiente de la luz solar.

Fuente: Egan y Olgyay (2001).

2.2 Características de la iluminación natural

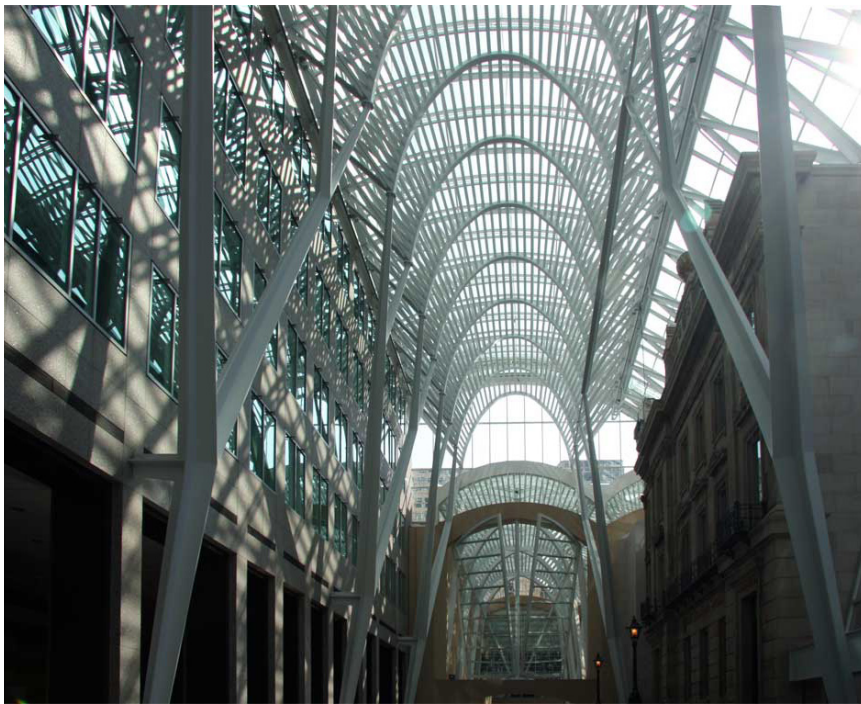
La iluminación natural implica el tratamiento de elementos de diseño arquitectónico en los cuales la luz natural, se convierte en un elemento susceptible de ser manipulado mediante dispositivos que permiten controlar el ingreso de la luz solar al interior de los espacios, caracterizándolos en función de la calidad de la iluminación lograda.

El manejo adecuado de ésta implica el conocimiento de las variables que determinan sus cualidades y la manera de manejarlas apropiadamente para conseguir unos determinados efectos ambientales o niveles de iluminación óptimos.

Las características de la iluminación natural dependen de varios aspectos:

1. La fuente de iluminación: en este caso se refiere al rayo lumínico solar que atraviesa las aberturas en paredes y techos del espacio para ingresar al interior. Las características de esta luz solar varía constantemente en el año y durante el día; sin embargo, es posible acercarse a obtener información de las características de la iluminación a través de datos estadísticos y cálculos probabilísticos, los cuales permiten obtener unos rangos de niveles de iluminación que se acercan a la realidad posible en el espacio.

2. Los aspectos geográficos: las características de iluminación también dependen de la posición geográfica de la edificación, ya que el grado de



Imágen 5 y 6: Aspectos formales: Museo MACBA - Barcelona;
Aspectos de posición de las fuentes lumínicas: BCE Place - Toronto

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

inclinación solar influye directamente en la iluminancia y la incidencia de los rayos directos del sol al interior de los espacios. Por otro lado, esta posición geográfica también condiciona la orientación del espacio con respecto al sol y las características de las aberturas (fuentes lumínicas) para lograr una determinada iluminación.

3. Los aspectos arquitectónicos, que pueden dividirse en tres grupos los cuales se interrelacionan y son interdependientes:

- Aspectos formales.

Las características lumínicas de un espacio dependen de las cualidades formales del mismo. Estas cualidades formales son muy importantes en el momento de definir qué tipo de iluminación se requiere para un espacio con una función específica.

- Aspectos de posición y diseño de las fuentes lumínicas (aberturas).

La iluminación de un espacio varía en función a la posición de las aberturas, el tamaño y su disposición con respecto a la posición del sol. Así, un espacio iluminado horizontalmente a través de lucernarios, es lumínicamente más eficiente que un espacio iluminado lateralmente a través de ventanas.

- Aspectos de materiales.

Los materiales de acabado interior de los espacios influyen notoriamente en la iluminación natural, ya que estos son los responsables de la iluminación

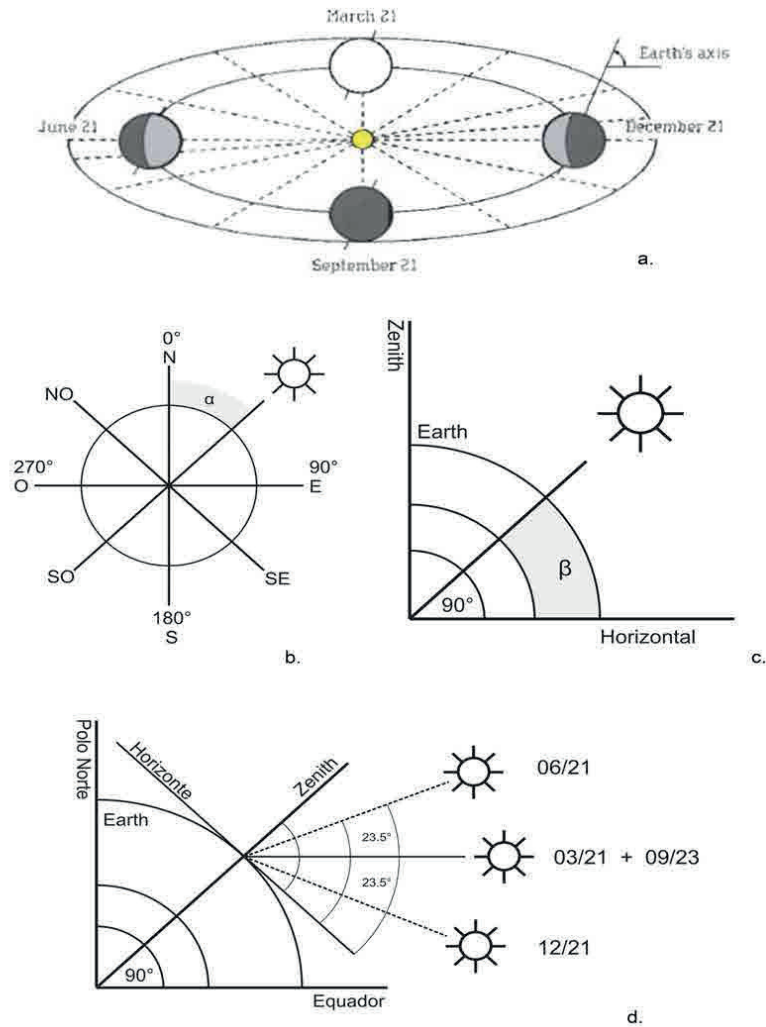
indirecta generada por la reflexión de la luz directa sobre las superficies de un espacio. Un espacio con superficies blancas, altamente reflejantes, presentará unos niveles de luminancia mucho más altos que el mismo espacio con un acabado de un material altamente absorbente de la luz.

2.3 Fuentes de iluminación

Se reconocen tres componentes de la luz natural: el haz directo procedente del sol, la luz difundida en la atmósfera (reconocida como luz del cielo), y la luz procedente de la reflexiones (principalmente el piso y los elementos del entorno), (Egan y Olgyay, 2001; Comité español de Iluminación, 2005).

Si bien la fuente principal de la iluminación natural es el Sol, la componente del cielo y las reflexiones en el entorno, juegan un papel muy importante en la caracterización de la iluminación natural. Moore (1985), describe las condiciones lumínicas a partir de la diferenciación de la manera como la luz ingresa al espacio o incide sobre las superficies de los cuerpos.

Desde esta perspectiva se concluye que la iluminación proveniente del sol puede ingresar al espacio interior de dos maneras: de manera directa cuando los rayos inciden directamente en las superficies del espacio después de ingresar a través de ventanas y aberturas en las paredes o techos, y de manera indirecta cuando los rayos son distribuidos en la atmósfera e ingresan al espacio de manera difusa, o cuando son reflejados por las diferentes superficies de los objetos del entorno natural y artificial.



Imágen 7: . a. Traslación de la tierra; b. Orientación del sol de acuerdo a la época del año; c. Altitud solar de acuerdo a la hora del día y la época del año; d. Ángulo de incidencia solar dependiendo del lugar geográfico, la época del año y la hora del día. Fuente: Köster (2004).

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

Para el estudio y análisis de la iluminación natural se deben considerar separadamente estas dos formas principales de iluminación, directa o indirecta, ya que estas determinan las características de la iluminación y la manera como se cualifica el espacio, incidiendo en el confort ambiental, la reproducción del color y la función del espacio entre otras.

- Fuentes directas

La iluminación natural directa varía en función a la posición del sol sobre la bóveda celeste, producto de los movimientos de rotación y traslación de la tierra, que determinan el día y las estaciones respectivamente. Estas condiciones a su vez influyen en la nubosidad del cielo que afecta la luminancia, ya que un cielo despejado tendrá pocas nubes para dispersar los rayos del sol, permitiendo que el rayo solar directo incida con toda su energía sobre las superficies de los cuerpos, pero con muy poca reflexión en las nubes, lo cual disminuye el aporte difuso del cielo.

- Rayos directos del sol:

Las características de la luz generada por los rayos del sol incidiendo directamente en un espacio interior, dependen del movimiento de rotación y traslación de la tierra. El movimiento de rotación se da en el eje Norte-Sur de la tierra en un periodo de 24 horas, (duración de un día) y el de traslación alrededor del sol en un periodo de un año. La rotación de la

tierra tiene una variación angular de 23°, la cual modifica la dirección de incidencia de los rayos del sol durante el año (Köster, 2004).

Debido a estos dos movimientos terrestres, la posición desde la cual percibimos que el sol arroja sus rayos lumínicos depende de:

- La localización de la edificación.:

Se define por el ángulo de latitud y longitud.

- La posición de la tierra en su órbita alrededor del sol y la variación angular debida a la rotación sobre su propio eje. Determinan las estaciones.
- La hora del día. Está dada por la rotación terrestre.

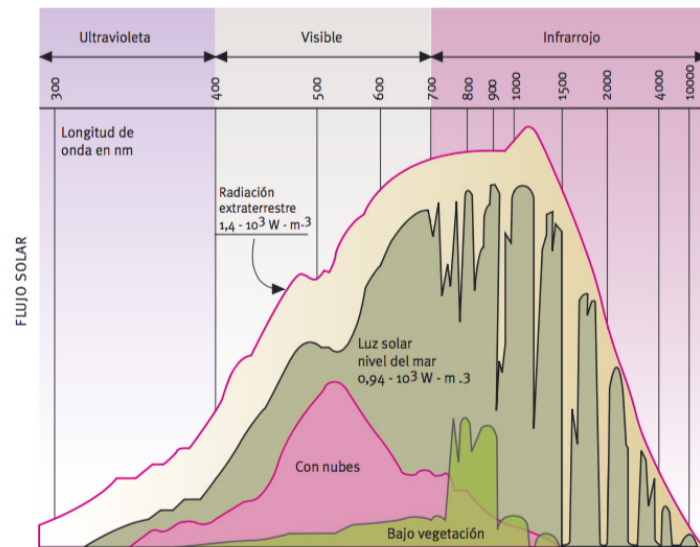
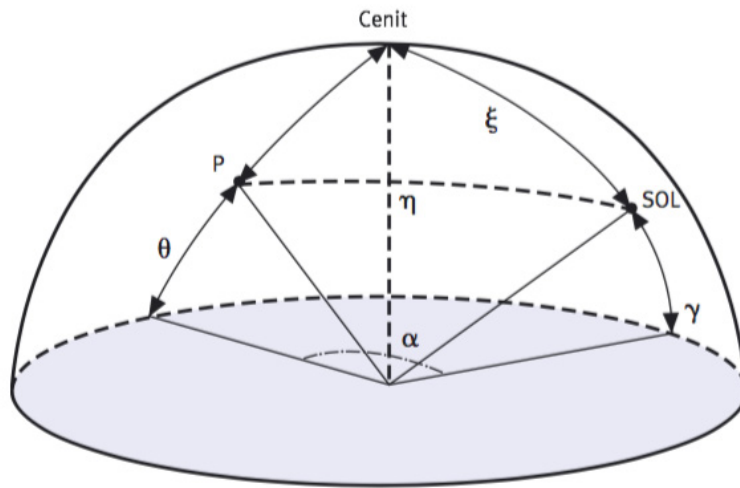


Imagen 8: Distribución de la radiación solar en la alta atmósfera y al nivel del mar, en diferentes circunstancias.

Fuente: Comité Español de Iluminación

La posición del sol sobre la bóveda celeste se mide a partir de un ángulo por encima del horizonte. Este ángulo se denomina Azimut, el cual expresa la posición del sol en la proyección horizontal del punto cardinal de incidencia solar. El máximo azimut se alcanza al medio día en el solsticio de verano (21 de Junio) y el mínimo en el solsticio de invierno (22 de Diciembre).

La variación de la posición del sol a lo largo del año hace que entre la elevación máxima del sol en el verano y la posición más baja en el invierno, varíen tanto el punto cardinal de salida como de ocultación del sol. Es por esto que la incidencia de los rayos del sol en un espacio interior, a través de una abertura en la fachada (ventana), varía permanentemente en el año y solo se repite dos veces una misma posición durante el año.



Imágen 9: Definición de los ángulos de la bóveda celeste.
Fuente: Comité Español de Iluminación

La iluminancia de la luz directa del sol varía entre 0 y 100,000 Lux aproximadamente, dependiendo de la altitud solar y de las características del cielo, lo cual es una intensidad muy alta para ser utilizada como iluminación directa en la realización de cualquier actividad. El color de temperatura correlacionado a la luz directa es de 3000 K cuando el sol está cerca del horizonte, y alrededor de 5800 K cuando está cerca al cenit.

La luz directa del sol es mucho más intensa que la reflejada del cielo; por lo tanto, el contraste que se observa entre un área iluminada directamente por los rayos y las otras es muy fuerte, lo cual puede llegar a causar deslumbramiento. Si esta luz es visible desde el espacio interior y se encuentra en el campo visual de los ocupantes, se puede generar un fuerte deslumbramiento en los usuarios, razón por la cual la luz directa del sol es poco utilizada en el espacio interior y solo se utiliza en determinados casos.

Por ejemplo, en los lugares de trabajo, donde el uso del espacio está definido para actividades específicas que requieren superficies iluminadas uniformemente, la penetración de la luz del sol se debe evitar durante las horas de trabajo. En cambio, en lugares de poca permanencia y poca actividad específica, los rayos directos pueden ser admitidos parcialmente o permanentemente, generando efectos psicológicos motivantes en los usuarios de los espacios.

• Luz natural

La luz natural es una luz difusa que se genera por la refracción y la reflexión de la luz del sol al atravesar la atmósfera. Cuando el cielo se encuentra nublado, las partículas atmosféricas alcanzan a difundir, refractar y reflejar todas las longitudes de onda de los rayos del sol, reflejándolos en todas las direcciones. Es por esto que se produce una luz blanquecina y difusa.

Por otro lado, cuando el cielo se encuentra despejado, las pocas partículas de la atmósfera solo alcanzan a refractar la luz de cortas longitudes y es por esto que los rayos solares alcanzan a pasar sin ser refractados o reflejados y el cielo adquiere el color azul característico del cielo despejado.

De lo anterior se concluye que el cielo en sí mismo no es un emisor de luz, pero debido a la reflexión generada en la atmósfera, este se convierte en una fuente importante de luz directa para cualquier espacio. Esta luz del cielo, ya sea cubierto o despejado, es una fuente de iluminación distribuida y suave, que no describe una dirección y por esto no presenta sombras definidas o direccionales.

Las características de iluminancia del cielo dependen básicamente de las condiciones de la altitud solar y de las condiciones de nubosidad. Para predecir esta iluminancia se requiere conocer la posición solar, la cual es fácilmente predecible a partir de métodos gráficos, pero las condiciones



Distribución de cielo de luminancia uniforme



Distribución de cielo cubierto estándar



Distribución de cielo azul transparente

*Imagen 10: Distribución de la luz natural en el cielo.
Fuente: Comité Español de Iluminación*

de nubosidad dependen de factores atmosféricos naturales que son difícilmente predecibles y cambian todos los años, por lo cual la iluminancia del cielo solo puede ser dada como un valor de probabilidad.

Una manera de estimar la iluminancia del cielo es caracterizándolo a partir de la distribución de la luminancia. A pesar de ser un punto de vista cualitativo y no cuantitativo, este método es básico para calcular los efectos de esta luz dentro de un espacio interior y con ella se logran obtener dos rangos de valores extremos de iluminancia (el mayor y el menor) y un rango intermedio.

Este método presenta dos problemas fundamentales: primero, que existen innumerables posibilidades de distribución de la luminancia debidas a la posición solar, pero solo tres de ellas pueden ser descritas por fórmulas matemáticas, y segundo, que los valores de la luminancia son variables estadísticas de datos tomados durante años.

La iluminancia del cielo es considerablemente inferior a la del sol. Esta presenta valores entre 5,000 y 20,000 lux aproximadamente, por lo cual es utilizada ampliamente para iluminar espacios interiores a través de grandes superficies acristaladas que pueden estar orientadas al norte o al sur, o en un ángulo en el cual no puedan ingresar rayos directos de sol, sobre todo para latitudes tropicales.

Para espacios interiores dedicados a funciones específicas tales como los museos, la luz difusa del cielo es muy adecuada, ya que esta no presenta unos niveles de iluminancia tan altos como los rayos solares, los cuales pueden llegar a deteriorar los objetos de exposición. Para el uso adecuado de esta luz, se han desarrollado estrategias de diseño que consiguen introducir la luz natural a todos los espacios, logrando una iluminación uniforme y con un consumo mínimo de energía.

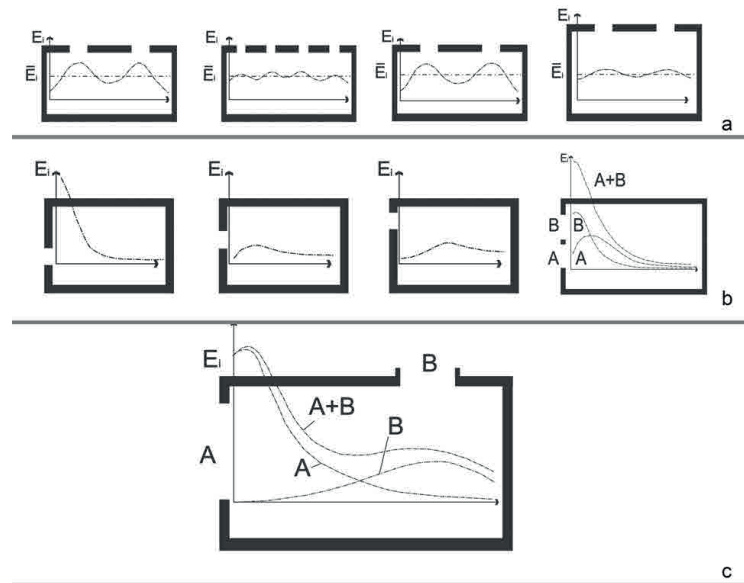
Estas estrategias impiden el ingreso directo de los rayos solares pero potencializan al máximo las cualidades lumínicas de la luz del cielo a través de múltiples rebotes sobre las superficies que conforman las aberturas por donde ingresa la luz y con el uso de materiales altamente reflejantes en las superficies de los espacios interiores.

Fuentes indirectas

Por otro lado, la iluminación indirecta proveniente del entorno puede variar de acuerdo a los elementos presentes en éste, los cuales pueden variar considerablemente a lo largo del año o de la vida útil de una construcción. Por ejemplo, el cambio del follaje de un jardín cercano a la ventana de una habitación, puede influir en la iluminación del espacio interior, así como una nueva construcción cercana a una ventana se convierte en una obstrucción que puede ayudar a reflejar luz indirecta u obstruir el aporte lumínico de otros elementos del entorno.

• Luz indirecta proveniente del entorno

El entorno, ya sea construido o natural, juega un rol pasivo pero importante en la iluminación de un espacio interior debido a que este puede reflejar u obstruir la iluminación directa del cielo o del sol, lo cual puede variar las condiciones lumínicas del espacio interior.



Imágen 11: a. Efecto en la distribución de la iluminancia por la disposición de las aberturas en el cielo del espacio; b. Efecto en la distribución de la iluminancia por la disposición de las aberturas en las paredes del espacio; c. Aumento de la iluminancia por combinación de aberturas.

Fuente: Egan y Olgway (2001).

A pesar de que los reflejos del entorno tiene un efecto secundario en la medida de la cantidad de luz aprovechable, es el color de las superficies del entorno, el que puede modificar considerablemente la cualidad de la luz reflejada desde estas superficies hacia el interior de un espacio, por lo cual es importante tener en cuenta las condiciones del entorno en el análisis lumínico de un espacio.

La parte del entorno visible desde el interior del espacio se divide en dos componentes: el piso o base sobre la cual está asentada la edificación que contiene el espacio, y las obstrucciones, las cuales son construcciones del entorno cercano que pueden bloquear la luz proveniente del sol y el cielo, o a su vez pueden actuar como superficies reflejantes.

• Luz indirecta generada por inter reflexiones en el espacio

Generalmente en los análisis lumínicos tendientes a evaluar los niveles de luz natural aprovechable en el espacio, el componente de iluminación indirecta generada por las inter reflexiones de la luz en la superficie de los objetos en el interior del espacio no se tienen en consideración, ya

que el aporte en cuanto al aumento del nivel de iluminación es muy poco en comparación a la cantidad de flujo lumínico aportado por las fuentes directas.

Sin embargo, en el análisis de las cualidades lumínicas de un espacio, la consideración de la iluminación indirecta generada por las inter reflexiones se vuelve muy importante, ya que esta influye en la percepción general del espacio, ayudando al entendimiento de las relaciones espaciales entre los objetos y la distribución de la iluminación en todo el espacio.

Esta iluminación varía de acuerdo a las características físicas de los materiales de las superficies de los objetos presentes en el espacio y a la posición y orientación de las mismas con respecto a las fuentes lumínicas directas. La adecuada disposición en el espacio de un elemento altamente reflectante puede permitir a un diseñador “transportar” la luz hasta lugares donde no existe una exposición a la fuente lumínica directa, logrando que el espacio pueda ser iluminado enteramente por fuentes lumínicas naturales a través de múltiples reflexiones de luz.

2.4 Comportamiento de la luz natural en el espacio interior

Moore (1985), plantea un esquema conceptual de análisis lumínico simple, mediante un gráfico que localiza la posición de la fuente de iluminación por donde ingresa la luz del sol, un punto objetivo de análisis en el interior

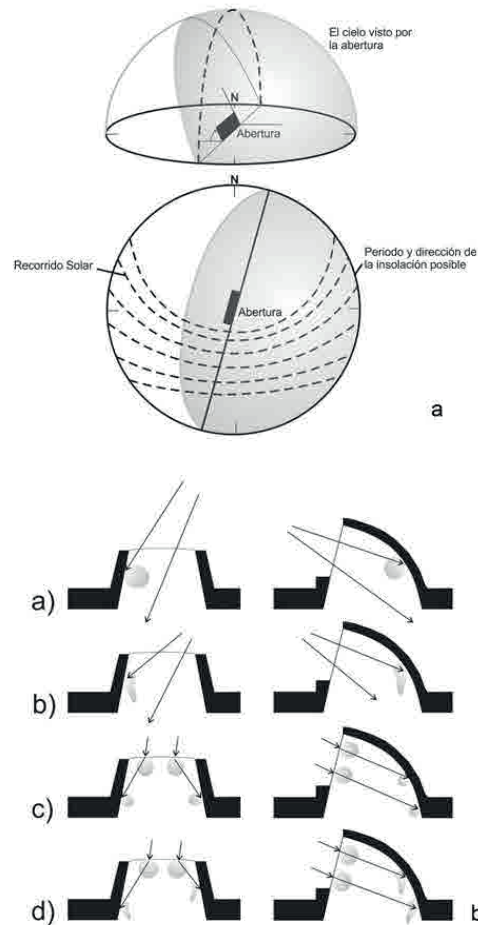


Imagen 12: a. Inclinación y orientación de las aberturas y su relación con el cielo visible; b. Comportamiento de los rayos de luz en las superficies: a) vidrio transparente y superficie reflectante, b) vidrio transparente y superficie brillante, c) vidrio translucido y superficie reflectante, d) vidrio translucido y superficie brillante.

del espacio y la dirección o recorrido generado entre estos dos puntos. Este gráfico permite analizar el recorrido del sol y su incidencia directa sobre las superficies del espacio y el punto de análisis.

Sin embargo, esta simplificación gráfica no da cuenta de la complejidad real del fenómeno lumínico en el espacio, pues es necesario considerar a la par la contribución directa de los rayos solares, la contribución directa del cielo y la indirecta del entorno cercano, ya que estas igualmente aportan iluminación al espacio interior a partir de la inter reflexión de los rayos solares.

De igual manera, es indispensable analizar el comportamiento de la luz con respecto a las propiedades reflectoras de los materiales que conforman el espacio, ya que las múltiples reflexiones de la luz en las superficies de los techos, pisos y paredes laterales pueden modificar considerablemente las condiciones de iluminación sobre el punto de análisis.

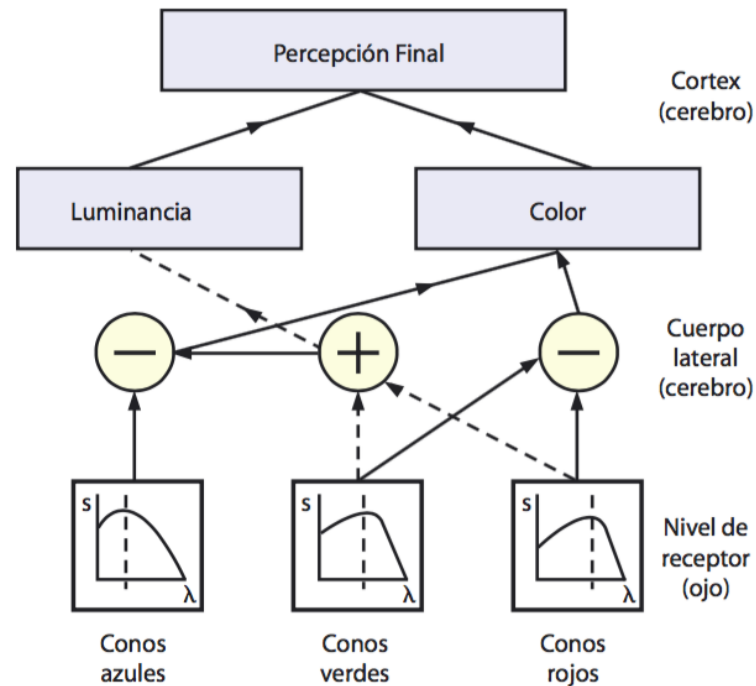
Todas las superficies que rodean al punto de análisis se convierten en fuentes lumínicas, pero son las ventanas o aberturas, las fuentes primarias de iluminación de un espacio interior ya que es a través de ellas que la iluminación directa del sol y del cielo ingresa al espacio.

2.5 La percepción visual del fenómeno lumínico

Norberg-Schulz (2001) plantea que:

“La percepción nos proporciona el conocimiento inmediato del mundo fenoménico. [...] No solo tenemos que orientarnos dentro de una multitud de cosas, sino que deberíamos también «comprender» o «juzgar» esas cosas para que lleguen a sernos útiles.[...] Todo objeto está representado por sus manifestaciones, es decir, por fenómenos intermedios u objetos «inferiores» que se denominan «propiedades» porque no son una cosa, pero pertenecen a la cosa de tal modo que la representan o simbolizan directamente; y no podemos asegurar que algún día no «encontremos» -experimentemos- nuevos fenómenos que tengan el carácter de ser propiedades de la misma cosa. Así, lo que llamamos «la cosa» es, no solo el conjunto de sus propiedades conocidas, sino el conjunto de las conocidas y desconocidas. De esto deducimos que un fenómeno se presenta (aparece), mientras que un objeto existe”.

Esta cita de Norberg-Schulz (2001), llevada al escenario del espacio arquitectónico, nos permite entender que la luz representa una característica del espacio, pero no es el espacio, es un fenómeno que lo caracteriza y nos da información de éste para podernos mover en él, orientarnos, experimentarlo. Sin embargo, por la estrecha e indivisible relación que se establece entre la percepción visual y la luz, podríamos llegar a establecer que este es el fenómeno más importante que caracteriza al espacio



Imágen 13: Representación esquemática de la visión de los colores en sentido de la vista y el cerebro.

Fuente: Comité Español de Iluminación

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural arquitectónico y de la capacidad que tengamos de comprenderlo o juzgarlo, dependerá nuestra capacidad de entender el espacio arquitectónico.

El espacio arquitectónico, como materialización de un entorno construido por el hombre, es visible gracias a la interacción existente entre sus componentes materiales y la luz que lo revela, sin embargo el estímulo visual primario no es suficiente para generar una idea del espacio a partir de la cual poder obtener un juicio de valor y otorgarle unas cualidades que lo identifican. Es la percepción la que nos permite construir las ideas e imágenes de los espacios, a partir de la interpretación psicológica y cultural de los estímulos visuales directos capturados a través del sistema neuroreceptor humano.

La imagen generada a partir de la percepción es la que nos permite representar el espacio, plasmando en estas representaciones las ideas que lo sustentan y caracterizan, haciéndolo único, pero a su vez, variable de acuerdo al juicio de valor dado por cada persona. La posibilidad de representación de un espacio no construido también depende de la percepción, pero no de una percepción directa mediada por los estímulos visuales, sino de la conjugación de las ideas e imágenes obtenidas en experiencias previas sobre otros espacios y a partir de las cuales tratamos de construir una nueva espacialidad.

La percepción de las condiciones lumínicas de un espacio no es única

ni estática, pues depende tanto de los aspectos fisiológicos del sistema neuroreceptor, como de los elementos psicológicos y culturales que determinan socialmente la manera como valoramos las cualidades de un espacio y construimos las ideas que lo sustentan.

De esta manera, si enfrentamos a personas que habitan en latitudes geográficas diferentes para evaluar lumínicamente un espacio, es muy posible que encontremos juicios de valoración divergentes, ya que estos dependen de la relación que se establece entre cada individuo y su espacio geográfico y sociocultural. Estas condiciones particulares hacen que un determinado grupo humano establezca una relación determinada hacia la luz, buscándola en ciertas épocas del año y evitándola en otras. Esta diversidad de posturas es la que enriquece nuestra visión del mundo y hace única la percepción que cada ser humano tiene de su entorno construido inmediato, siendo la luz uno de los componentes más determinantes en esta relación.

Para Michel (1996), la percepción visual se genera cuando un observador entra en contacto con el entorno exterior que le rodea y mediante un complejo proceso neuronal, las “cosas vistas” se convierten en “cosas percibidas”.

En este proceso se distinguen dos momentos:

1. El primer paso consiste en la captura o registro del estímulo visual, dependiente del sistema receptor y sucede cuando la luz entra en los ojos, proveniente de la reflexión sobre las superficies de los cuerpos del entorno. Las células receptoras de la retina, conos y bastones, responden a este estímulo lumínico, convirtiendo la energía electromagnética, luz, en actividad neuronal.

2. El segundo es el de la construcción de imágenes reconocibles que permitan comprender e interactuar en el entorno. Así, la luz percibida a través de la vista es traducida a actividad neuronal en la mente, lo cual genera la percepción. Se establece entonces un dialogo entre el objeto visto y lo percibido, que nos permite ver y reconocer el mundo que nos rodea.

Por esto, abordar el estudio de la percepción implica por un lado entender cómo ven nuestros ojos, lo cual es significativamente importante para poder explicar cómo podemos representar lo visualizado, y por otro, entender cómo se interpreta la información visual y se reconoce el mundo que nos rodea. El estudio de la percepción se constituye entonces en el elemento clave para entender como el hombre recibe el estímulo lumínico y construye la información que le permite obtener la representación visual de su entorno.

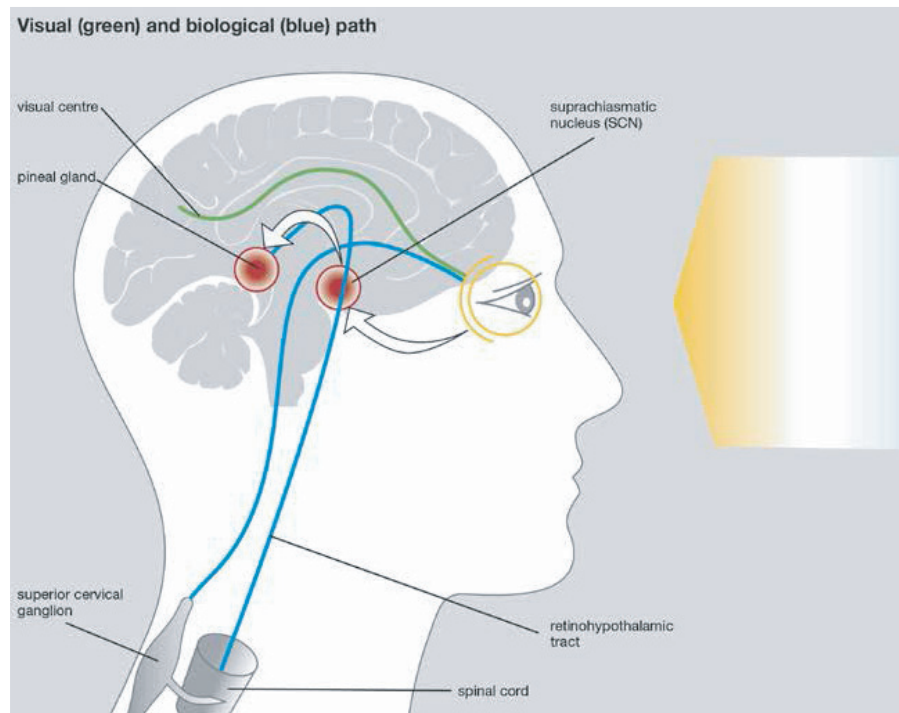


Imagen 14: Respuesta del cerebro humano ante la luz natural.
Fuente: Licht.de, 2010

Quizá uno de los aspectos más olvidados en la valoración cualitativa que hacemos de los espacios es el análisis de la percepción lumínica. Generalmente hacemos valoraciones formales, materiales, de color y de relaciones espaciales, sin embargo olvidamos que es la luz la que nos permite configurar y visualizar todos estos componentes del espacio y que de ella depende que estas características materiales sean favorables o no para obtener una imagen que describa el espacio.

Dependiendo de la iluminación de un espacio podemos variar la percepción de la profundidad del espacio, de su altura, de su color, de su ambiente o de su materialidad, entre otros muchos aspectos, con lo cual podemos llegar a concluir que un espacio no es en sí mismo sino que depende de la interacción de sus componentes materiales bajo el influjo de la luz y la capacidad que tengamos para percibir y valorar estas cualidades (Michel, 1996).

Los estudios de percepción visual se han centrado en el reconocimiento de la forma de los objetos y las reacciones espaciales, en función a las características visuales de las superficies, llegando al punto de plantear que para reconocer una superficie solo basta con identificar sus límites. Incluso, si estos límites son difusos o están rotos, la mente es capaz de completarlos generando un reconocimiento de la unidad de la superficie.



*Imagen 15: Modelo del efecto Ganzfeld (2008) James Turrell.
Fuente: Zooey Braun*

La complejidad del proceso perceptivo lumínico nos lleva a aceptar el hecho de que no existe una imagen única que represente las condiciones lumínicas de un espacio y sea válida para todas las personas, sin embargo es viable la generación de una imagen representativa que acoja unos rangos de entendimiento y consenso aceptables como verdaderos para un conjunto social y que responda a las expectativas de quien realiza la representación.

Por esto, uno de los elementos más importantes para analizar la percepción de la iluminación natural consiste en comprender que no percibimos cantidades de luminancias o flujos lumínicos, sino que tenemos la capacidad captar y adaptarnos a los cambios lumínicos en el espacio. Lo que hace el ojo y la mente es establecer una relación de contrastes de luminancias de las superficies de los objetos y, a partir de estos, acomodarse para poder percibir toda la gama posible de luminosidades presentes en el espacio (Serra, 2002).

El ojo humano tiene la capacidad de adaptarse a distintos niveles de iluminación dentro de un amplio margen, siendo capaz de distinguir entre objetos claros y oscuros cuando la iluminación varía lentamente, como es el caso de la luz natural en un espacio interior. Con esta luz, la capacidad de la percepción visual se mantiene prácticamente constante dentro de este amplio margen, a pesar de reducirse el nivel de luminancia. Esta capacidad perceptiva esta descrita por la ley de la constancia del contraste (Ley de Weber-Fechner), estando determinada por ciertos factores que inciden en



*Imagen 16: Modelo del efecto Ganzfeld (2008) James Turrell.
Fuente: Zooey Braun*

ella: La sensibilidad diferencial al contraste, la agudeza visual, la rapidez de la percepción y la duración del esfuerzo visual (Yáñez, 2008).

Esto significa que de acuerdo a nuestra capacidad perceptiva y la variabilidad de las condiciones lumínicas producidas por el sol y la atmósfera, nunca podríamos tener una percepción única de la luminosidad del espacio, y cada vez que visitemos de nuevo un espacio tendremos una percepción diferente del mismo, a pesar de que existan elementos de constancia que nos permitan identificarlo como el mismo espacio.

De allí se concluye que al no existir una percepción única de un espacio, mucho menos existirá una representación única del mismo, con lo cual, la percepción y la representación son elementos subjetivos que dependen tanto de las características físicas de los objetos y las fuentes de luz, como de la capacidad del observador para captar y percibir los efectos lumínicos producidos en el espacio.

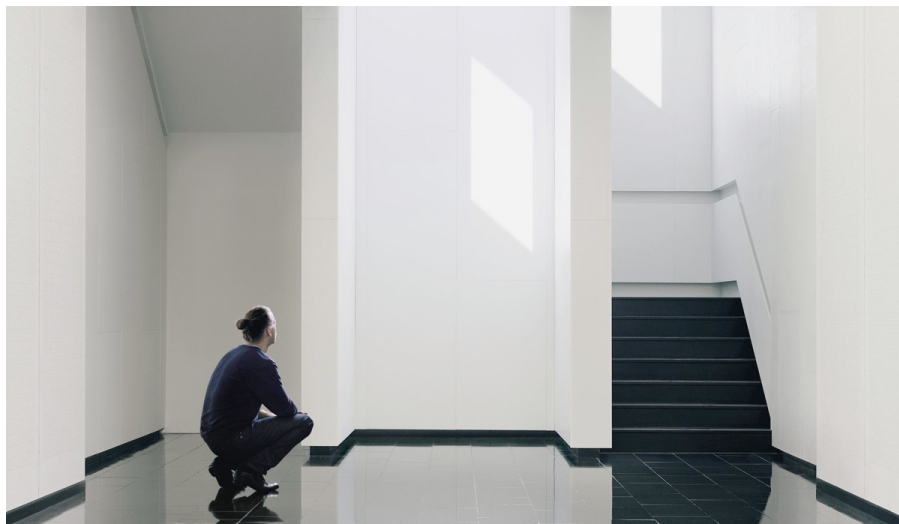
Por otro lado se debe tener en cuenta la inmaterialidad de la iluminación, como uno de los aspectos que más influyen en la percepción de la iluminación. Lo que percibimos de nuestro entorno es el efecto del fenómeno lumínico interactuado con los cuerpos en el espacio que ingresa por nuestros ojos como rayos lumínicos reflejados de las superficies de los cuerpos. Es por esto que la información lumínica que captamos no depende únicamente de las propiedades físicas de la luz que incide en

los espacios, sino que también depende de las propiedades físicas de las superficies de los objetos que la reflejan.

Cuando estamos en un espacio y vemos a través de una ventana o fuente lumínica, no vemos la luz que entra por la ventana, sino el marco de la ventana, el vidrio que la cubre, las paredes que la soportan y posiblemente un rayo lumínico que choca contra el piso dibujando la forma de la abertura de la ventana y generando la sombra de los muros. Esta fenomenología es la que nos permite percibir la luz, pero no de manera directa, sino como fenómeno que se manifiesta por la interacción con los cuerpos en el espacio.

No podemos preguntarnos cómo es la forma de la luz, cómo es su color o cómo son sus detalles, la única característica visible atribuible directamente es su intensidad. Esta intensidad lumínica es la que determina la “visibilidad” de los objetos, por lo cual analizándola o extrayendo esta información, sería posible aislarla como elemento modificador de la percepción del espacio y estudiar tanto sus características como la de los objetos.

Es importante de igual manera tener en cuenta que la iluminación natural es un fenómeno que cambia permanentemente, por lo cual la percepción de los espacios iluminados con este tipo de luz es igualmente cambiante y variada. A medida que crece nuestra experiencia en el entorno y somos capaces de reconocer más y diversos efectos lumínicos en el espacio, nuestra capacidad perceptiva, de identificación y reconocimiento del espacio aumenta.



*Imagen 17: Daniel Rybakken : Daylight entrance, Stockholm.
Fuente: Daniel Rybakken*



3

Luz artificial

3.1 Tipos de iluminación artificial

3.2 Conceptos básicos

3.3 Confort visual

La Luz Artificial

La luz diurna y la llama fueron hasta el S. XVIII las únicas fuentes de luz de las que dispuso el ser humano. La iluminación artificial modificó la vida humana permitiendo la realización de actividades que eran posibles solamente durante las horas diurnas.

El alumbrado con gas y las fuentes de luz eléctrica permitieron proporcionar iluminancias similares a las de la luz natural. Si bien, en un principio, el reto fundamental era conseguir una cantidad suficiente de luz, el siguiente paso fue manejar ésta de forma racional para evitar deslumbramientos. Es indudable que una correcta iluminación es indispensable para el confort de sus ocupantes.

3.1 Tipos de iluminación artificial

3.1.1 Iluminación eléctrica

En los inicios del siglo XX la iluminación a gas fue reemplazada por la energía eléctrica. Los primeros experimentos fueron realizados por el químico británico sir Humphry Davy, quien fabricó arcos eléctricos y provocó la incandescencia de un fino hilo de platino en el aire al hacer pasar una corriente a través de él. El 27 de octubre de 1879, Thomas Alva Edison, inventor estadounidense, fue quien perfeccionó la lámpara eléctrica de

filamento de carbono, que permaneció encendida en Nueva York durante dos días. En 1878 fundó la Edison Electric Light Company. Es entonces que se inicia la era de la iluminación eléctrica.

Fue en 1882 que Edison instaló la primera Central Eléctrica en Pearl Street, primera calle iluminada con electricidad. Después otras ciudades del país iban instalando en sus calles el alumbrado público eléctrico. En el momento en que se impone el uso de la lámpara incandescente, se consigue una notable mejora en materia de iluminación artificial, en relación a las antiguas fuentes de iluminación que se habían usado hasta entonces.

3.1.2 Lámpara Incandescente

Se denomina Lámpara Incandescente, bombilla, lamparita o bombita de luz al dispositivo que produce luz mediante el calentamiento por efecto Joule de un filamento metálico, hasta ponerlo al rojo blanco, mediante el paso de corriente eléctrica.

La eficiencia energética es muy baja, por lo 8-12 lm / W (lúmenes por vatio), y un tiempo de vida de 1000 horas. Tiene una temperatura de color fija a 2700K. Hoy en día ofrece la más alta calidad de iluminación de color fijo con un CRI a 100 (McKenzie y Frost, 2012).

Es barato y más seguro que la llama desnuda, sin embargo, emite radiación

Imagen 18: Composición de lámparas Incandescentes

Foto: Osram





*Imagen 19: Composición de lámparas Fluorescentes
Foto: Osram*



*Imagen 20: Composición de lámparas de descarga
Foto: Osram*

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural de calor y rayos UV. Debido a que las bombillas incandescentes son ineficientes recientemente han sido prohibidas en varios países. (Bylund, L., 2012) y están siendo reemplazados gradualmente por fluorescentes y LED.

3.1.3 Lámpara Fluorescente

Es una lámpara de descarga de baja presión en forma de tubo, rellena en su interior de vapor de mercurio. La radiación ultravioleta generada por la descarga de mercurio se convierte en luz visible por los fluorescentes que se encuentran en la pared interior del depósito de descarga. Mediante distintos fluorescentes se consiguen una serie de colores de luz y distintas calidades de reproducción cromática.

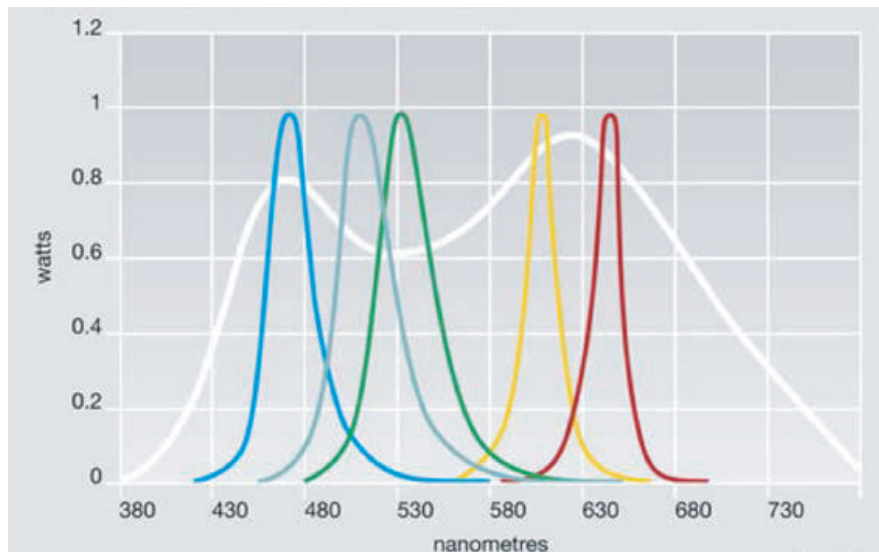
La lámpara fluorescente posee generalmente electrodos calentados y puede así encenderse con tensiones en comparación bajas. Las lámparas fluorescentes requieren de balastos, reactancias o reactancias electrónicas.

3.1.4 Lámpara de descarga

Fuente luminosa que produce luz mediante una descarga eléctrica en gases o vapores metálicos presentes en el interior de la ampolla. Las lámparas de descarga basan su funcionamiento en el fenómeno de descarga en el cual la luz es emitida por medio de un gas ionizado en lugar de un filamento sólido.



Imágen 21: Lámpara LED comparada con lámparas incandescentes.
Fuente: Osram



Imágen 22: Espectro de LEDs blancos y de colores.
Fuente: Licht.de (2010)

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

Para encender las lámparas de descarga se requiere de un dispositivo llamado reactancia o balasto, que produce el encendido con un alto voltaje inicial y luego disminuye la energía eléctrica al nivel operativo normal. Los balastos electromagnéticos son los tradicionales de filamentos de cobre, que ya están siendo reemplazados por balastos electrónicos. Dentro de las lámparas de descarga debemos distinguir entre lámparas de descarga de baja presión y lámparas de descarga de alta presión.

3.1.5 Lámparas LED

La única energía de la luz más eficiente que los LED es la luz solar. La fuente LED tiene una eficiencia energética en 40-100 lm /W dando una vida de 50,000-100,000 horas. Las recientes mejoras han dado una eficiencia teórica de 330lm / W a 6,500 K (McKenzie, Dr.J y F. Frost, 2012).

Ellos tienen un CRI de 80-94 y son la fuente de luz más respetuosa del medio ambiente. Ellos son regulables, conmutable y compatible con los sistemas de control de iluminación. El LED no irradia calor ni contiene rayos UV. LED es el tipo de iluminación artificial que es más fácil de controlar, con la mayor gama de posibilidades (Frost, F, 2012).

En la industria de la iluminación, los LED son conocidos por ser la luz del futuro (Bylund, L., 2012). Hay dos maneras utilizadas para crear una luz blanca con LED. La combinación de LED rojo, verde y azul crea una luz blanca,

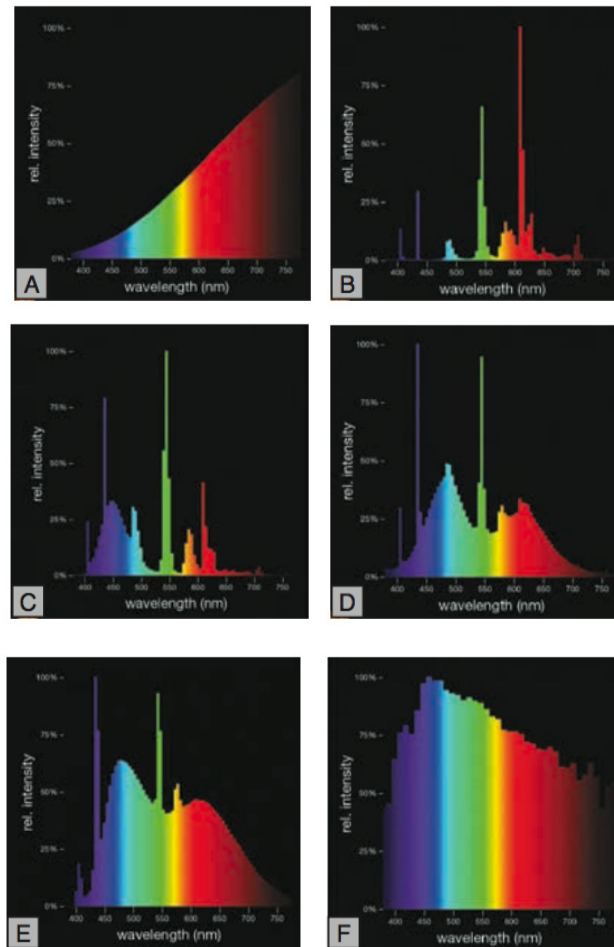


Imagen 23: Color Rendering (Licht.de, 2010)

Fuente: Licht.de, (2010)

A: Espectro de una lámpara de halógeno, tiene un espectro continuo con alto contenido de rojo.

B: 825 Color de la luz, lámpara fluorescente. Similar en apariencia a una lámpara incandescente tenue, y tiene un efecto biológico bajo.

C: 880 Color de la luz, lámpara fluorescente con 17,000 Kelvin de temperatura de color. La luz tiene un alto contenido de azul y un alto efecto biológico.

D: Color de luz 965, la luz blanca de la lámpara fluorescente óptima para la máxima representación de color.

E: Color 965, luz blanca fluorescente para la terapia de luz.

De lámparas fluorescentes especiales con un mayor contenido de azul.

F: luz del día

pero el rendimiento de color sólo consta de los tres colores básicos y el CRI es muy bajo. Cuando se utiliza luz azul en combinación con fósforo, el LED azul activa el fósforo que comienza a brillar, en consecuencia, se crea una distribución más equilibrada de colores (Licht.de, 2010).

3.2 Conceptos básicos de iluminación

3.2.1 Niveles de iluminación

Los niveles de iluminación se miden en Lux. La luz natural puede variar desde menos de 1 lux (luz de la luna) a 120,000 lux (la luz del sol más brillante). Sombra iluminada por el cielo azul claro en el mediodía tiene 20,000 lux. Un típico día nublado varía de 10,000 lux a 25,000 lux, mientras el amanecer o al atardecer en un día claro tiene 400 lux (Schlyter, P., 1997).

Cuando se simula la luz del día, queremos crear una luz que no es demasiado brillante a la vista, pero lo suficientemente fuerte como para iluminar los espacios en los que necesitamos para concentrarnos en tareas como la lectura o el aprendizaje. Un nivel de iluminación perfecto variará a lo largo del día, que debe ser considerado cuando se trata de simular un ambiente natural. La preferencia de la iluminación y el espectro de color puede variar de persona a persona (Forde y Nervik, 2012).

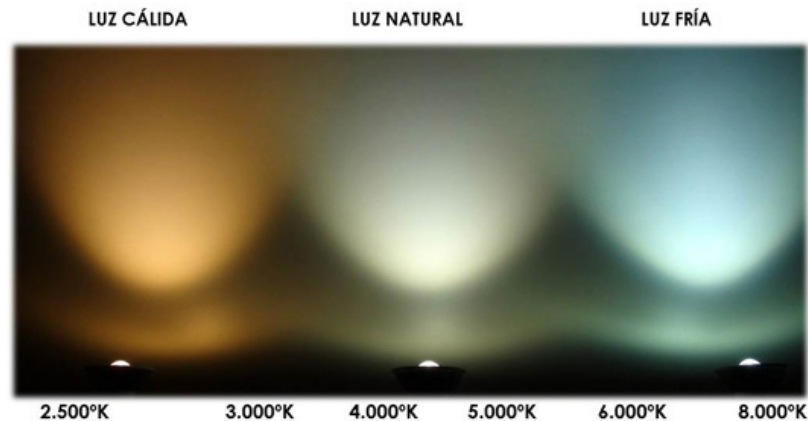
3.2.2 Espectro

Una fuente de espectro completo tiene todos los colores en su espectro. Sólo hay dos fuentes de luz actuales que tienen un cierto espectro completo: el sol y la luz incandescente. Al mirar a través de un espectrómetro a la luz del día o la incandescente se verán colores similares a un arco iris, ya que irradian todos los colores. La luz solar tiene algunas líneas negras en el espectro, como parte de la luz es absorbida por la atmósfera. La iluminación artificial fluorescente tiene muchas líneas oscuras, porque la luz se compone de varias longitudes de onda no visuales. Para simular la luz del día, es importante tener en cuenta la relación de gama fotónica.

3.2.3 Luminancia

El término luminancia fue adoptado para designar con precisión adecuada, ciertas propiedades que en lenguaje coloquial se engloban bajo el término brillo, incorporando consideraciones relativas a la posición del observador. Para un observador situado a una cierta distancia y ángulo de una superficie que emite o refleja luz, es la relación entre la luz que abandona la superficie y el área que ésta aparenta para el mismo.

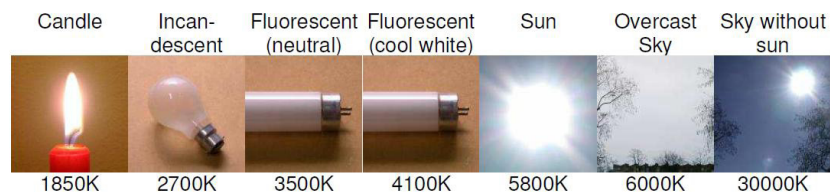
3.2.4 Temperatura del color



Apariencia de color	Temperatura de color correlacionada, T_c K
Cálida	inferior a 3300 K
Intermedia	3300 a 5300 K
Fría	superior a 5300 K

Imagen 24: Grupo de apariencia de color de lámparas.

Fuente: Comité Español de Iluminación



La temperatura de color indica el color de la luz; a 0 grados Kelvin es negro puro. En la iluminación artificial, una luz blanca cálida es aproximadamente 2700K, 3000K blanco neutro en, y 6500K blanco frío. La temperatura de color más alta contiene más longitudes de onda corta de color azul, una temperatura más baja, más de las longitudes de onda más larga de color rojo. La luz natural tendrá un color rojo cálido como el sol se levanta con una luminancia baja, un color azul fresco de la mañana y durante el día, mientras que la luz de la tarde tiene más rojo que las longitudes de onda azules.

3.2.5 Rendimiento de color

La representación del color se mide mediante el índice de rendimiento de color (CRI) y se utiliza para comparar el espectro de color. Un buen CRI tiene una distribución uniforme de todos los colores en el espectro. IRC 100 es un espectro de colores perfecta; CRI 90 un muy buen espectro de color y CRI 80 un buen espectro de color. El objetivo de la iluminación artificial es ser lo más cercano a la luz natural como sea posible, lo que significa CRI 100.

La capacidad del ojo humano es dependiente del contenido espectral de la luz. En la luz del día el ojo humano es capaz de diferenciar entre 500.000 de

los diferentes tonos de colores, mientras que en condiciones normales la cifra correspondiente para la iluminación fluorescente es 8. (Hashmi K., 2006).

3.3 Confort visual

Es el grado de satisfacción visual creado por la iluminación. Es la sensación subjetiva que percibe el usuario. Las recomendaciones visuales basadas únicamente en parámetros de capacidad visual son generalmente incorrectos. Antes de realizar cualquier planteamiento de solución, deben estudiarse las necesidades del usuario, de la tarea visual que desarrolla y del entorno donde va a realizarse.

La agudeza visual es una capacidad visual que evoluciona con la edad, y a partir de los 45 años comienza a reducirse. Una persona de 60 años, requiere de una cantidad de luz muy superior a la de una de 30 para realizar la misma tarea visual. De la misma forma, si se está en un local con paredes oscuras, aunque el nivel de iluminación sea el recomendado para esas condiciones, se puede tener la sensación de que falta luz.

3.3.1 Parámetros lumínicos

Para llegar a obtener una solución satisfactoria, deben tenerse en cuenta un conjunto de parámetros y variables que definan de una forma

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural conjunta las necesidades visuales. Se debe ver y reconocer y para que se lleve a cabo el proceso de visión, deben darse una serie de condiciones: claridad mínima (sin un mínimo de luz que sensibilice los fotorreceptores del ojo, no se percibirá la escena visual), contraste mínimo (si un objeto no resalta sobre su fondo, no se tendrá un mínimo contraste), tamaño mínimo de los objetos (si un objeto no ocupa un espacio mínimo dentro de la escena visual, este no será percibido) y tiempo mínimo de observación (si un objeto no permanece un tiempo mínimo en la escena visual, este no será percibido).

a. Color percibido

El espectro útil en luminotecnia es aquel comprendido en las longitudes de onda visibles y está compuesto por siete colores (rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta). Estudios fisiológicos han determinado que el ojo humano es más sensible a la luz verde-amarilla. Ello responde a que este órgano perceptivo se ha adaptado a lo largo de la evolución humana a la luz solar que, si bien emite todos los colores del espectro, concentra su mayor intensidad en estos colores.

b. Reproducción de color

Cuando las ondas luminosas caen sobre una superficie cualquiera, penetran en la sustancia en una pequeñísima capa. En parte son absorbidas y en parte rechazadas en todas direcciones, es decir, son difundidas. La sensación de color es, precisamente por la porción del



Imagen 25: Niveles de iluminación en función de las tareas realizadas.
Fuente: Comité Español de Iluminación

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

Tipo dependencia o actividad	Iluminancia media horizontal (lux)	Clase de calidad al deslumbramiento directo	Grupo de Rendimiento de color
Aula de enseñanza: General, trabajos manuales, etc.	300	B	1B
Pizarra (plano vertical)	300		
Aula de informática: General	500	A	1B
Pizarra (plano vertical)	300		
Aula de dibujo: General	750	A	1A
Pizarra (plano vertical)	300		
Aula laboratorio: General	500	B	1B
Pizarra (plano vertical)	300		
Aula taller: Trabajo basto	300	D	2A
Trabajo fino	500	B	2A

Parámetros de iluminación recomendados en centros docentes.
Fuente: Comité Español de Iluminación

“El confort lumínico se alcanza cuando es posible ver los objetos dentro de un recinto sin provocar cansancio o molestia y en un ambiente de colores agradables para las personas.”

Tono de luz. Temperatura de color	Tipo de actividad o de iluminación
Tonos cálidos. < 3000 K	Entornos decorados con tonos claros Áreas de descanso. Salas de espera. Zonas con usuarios de avanzada edad Áreas de esparcimiento. Bajos niveles de iluminación
Tonos neutros. 3300 - 5000 K	Lugares con importante aportación de luz natural Tareas visuales de requisitos medios.
Tonos fríos. > 5000 K	Entornos decorados con tonos fríos Altos niveles de iluminación Para enfatizar la impresión técnica. Tareas visuales de alta concentración

Índice de reproducción cromática (Ra)	Grupo de Rendimiento de color	Cálido < 3300 K	Neutro 3300-5000 K	Frío > 5000 K
Excelente 90-100	1A	Halógenas. Fluorescencia lineal y compacta	Fluorescencia lineal y compacta	Fluorescencia lineal y compacta
Bueno 80-90	2A	Fluorescencia lineal y compacta. Sodio Blanco	Fluorescencia lineal y compacta. Halógenos e Inducción	
Razonable 70-80	1B	Halógenos metálicos	Halógenos metálicos	Halógenos metálicos
Mala < 70	2B	Mercurio. Sodio	Mercurio	

Imagen 26: Tonalidades e índice de reproducción cromática en función de las tareas realizadas.

Fuente: Comité Español de Iluminación

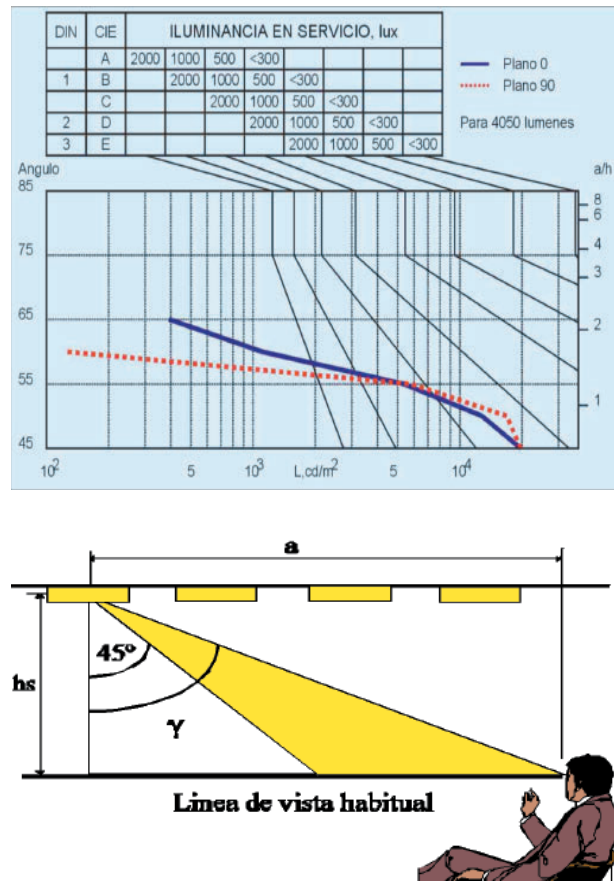
La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural espectro que es devuelta o difundida. Tanto la reproducción del color de los objetos que nos rodean como el emitido por la fuente, inducen a determinadas respuestas psicológicas que dependen del usuario, del momento y lugar de la escena.

c. Monotonía vs. Contraste

La existencia de contrastes adecuados de colores y luminancias será necesaria para asegurar la apreciación de los relieves sin recurrir a efectos de sombras demasiado marcados (poco favorables para el confort visual) y evitar la sensación de monotonía que influye, por ejemplo, negativamente en la eficiencia de trabajo. La iluminación localizada, que deja las áreas circundantes en penumbra, obliga al órgano de la visión a una acomodación constante cada vez que la vista sale de la zona iluminada, provocando fatiga. La solución es considerar el nivel de iluminación del ambiente en general. Recíprocamente, un ambiente carente de iluminación localizada puede resultar excesivamente homogéneo para quienes se desenvuelven en él.

d. Deslumbramiento

La capacidad de la adaptación visual no es ilimitada. Cuando el estímulo exterior es muy elevado o se produce una variación importante en su magnitud, se produce una modificación de la capacidad de visión llamada deslumbramiento, lo que provoca una pérdida de las capacidades visuales.



Imagén 27: Ángulos en los que hay que controlar el deslumbramiento.
Fuente: Comité Español de Iluminación

Depende de la posición del objeto o de la fuente dentro del campo visual y de la diferencia de luminancia entre la fuente y su fondo. Las luminancias relativas demasiado elevadas traen como resultado molestias de tipo tanto fisiológicas (reducción de la capacidad de percepción) como psicológicas (fatiga, estado nervioso, etc.).

El deslumbramiento directo proviene de las luminarias con sus fuentes de luz expuestas a la vista y con ángulos de elevación pequeños sobre la línea de visión del observador. Para evitarlo deberá limitarse la luminancia de las fuentes a ciertos valores y direcciones críticas, hacia y debajo de la línea horizontal de la visión.

El deslumbramiento por reflexión cuando el valor de luminancia de los objetos que rodean al observador causan molestias en sus órganos visuales, se produce el efecto velo, que reduce la eficiencia visual por elevación del límite mínimo de contraste. Estas molestias visuales no se deben confundir con las reflexiones necesarias para destacar el relieve de los objetos.



4

Tecnología avanzada de Simulación

4.1 Iluminación biodinámica

4.2 Ilusiones visuales

4.1 Iluminación biodinámica

Iluminación biodinámica es la luz que se mueve a través del espectro de color a horas preestablecidas del día (D'Warte, G., 2012). Al igual que los cambios de la luz del sol por la mañana a la noche, la iluminación dinámica artificial ha sido desarrollada para proporcionar la luz adecuada en el momento adecuado. Un estudio realizado en 2011 implementa iluminación dinámica en las escuelas, lo que resulta en un aumento de la velocidad de lectura por 35%. Los estudiantes fueron mejores en concentrarse, lo que reduce los errores en un 45% y la hiperactividad en el aula se redujo en un 76%. (McKenzie, Dr.J y la helada F., 2012).

El mercado de la iluminación actual tiene varias opciones de iluminación biodinámica. La luz biodinámica cubre el espectro completo electromagnético desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, y todas las longitudes de onda que son útiles para la vida vegetal o animal. (Lighting Research Center, 2005)

Cuando se utiliza el término de espectro completo en iluminación eléctrica ya no es un término técnico (Rea, M., et al, 2005). El Dr. John Ott inventó el término en la década de los 60 para describir la luz eléctrica que simula el espectro visible y ultravioleta de la luz. El término fue utilizado como una estrategia de marketing para vender las fuentes de luz y todavía se utiliza hoy en día (Rea, M., et al, 2005), (Niedecken, H., 2012).



Imágen 28: Diferentes lámparas biodinámicas del mercado.
Fuente: Imageshack

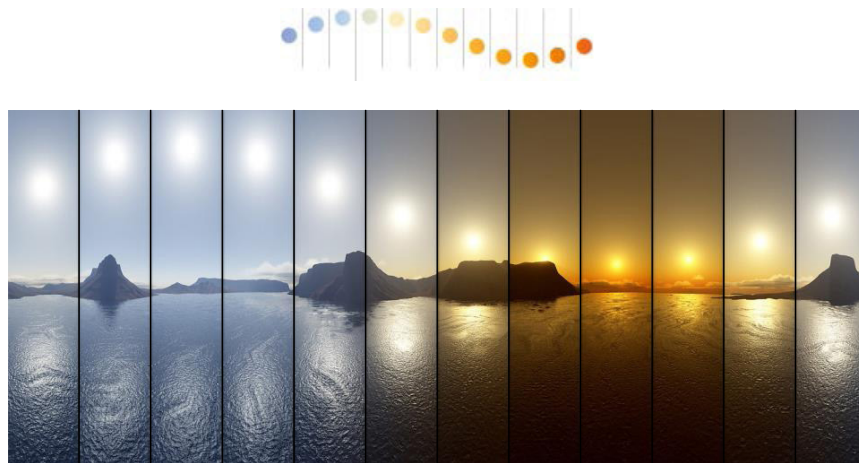


Fig. 10 Human Center lighting, BAG electronics & LUMITECH. Fuente: Imageshack



Luz Natural



Luz Fluorescente



Luz biodinámica

Imagen 29: Diferentes espectros. Human Center lighting, BAG electronics & LUMITECH. Fuente: Imageshack

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

El gráfico azul representa el espectro de la luz del día. El gráfico rojo (GE Reveal 60W lámpara incandescente) y verde (Duro-Test Vita-Lite 5500 lámpara fluorescente) representan dos diferentes fuentes de luz eléctrica que dicen ser de espectro completo. La lámpara incandescente (roja) tiene un espectro relativamente uniforme, pero casi no contiene ninguna de las partes vitales azules del espectro (460-484nm), (Rea, M., et al, 2005). Los picos verdes del gráfico muestran en todos los colores primarios, pero carecen de la información de color entre ellos.

Sustituyendo la palabra “artificial” con “natural” implicamos que la luz “natural” es siempre mejor que la artificial. Los desarrolladores tratan de esconder el hecho de que la luz se hace artificialmente, y no puede proporcionar la misma luz que la verdadera luz natural. Los productos vienen con promesas de que pueden simular la luz del día y dar beneficios tales como una mejor visibilidad, mejorar la salud y una mayor productividad. (Rea, M., et al, 2005)

Cada empresa tiene su propia definición de lo que es una luz de espectro completo, lo que hace que sea imposible para los consumidores saber exactamente lo que están recibiendo o qué esperar. Dado que dos fuentes de luz que dicen ser para todo el espectro puede tener grandes diferencias tanto en el color y el rendimiento visual, tenemos que mirar las especificaciones técnicas para lograr un rendimiento visual más similar a la luz natural. Los resultados confirman que la iluminación de espectro

PHILIPS



	White and color ambiance	White ambiance	White
Control inteligente	✓	✓	✓
Control desde fuera de casa	✓	✓	✓
Programaciones de luz	✓	✓	✓
Regulación cómoda	✓	✓	✓
Crea tu ambiente	✓	✓	
Dormir y despertar	✓	✓	
Bienestar	✓	✓	
Pinta con luz	✓		
Sincroniza con música	✓		
Sincroniza con vídeos	✓		

Imágen 30: Diferentes lámparas biodinámicas Philips Hue.
Fuente: www2.meethue.com/es-es/productos/

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural completo mejora la percepción del color, la claridad visual y la productividad. (Rea, M., et al, 2005). En la actualidad se está discutiendo que CRI (índice de reproducción cromática) no es una forma adecuada para medir la iluminación LED (X-Rite, 2007). Por el momento, los investigadores están tratando de desarrollar una nueva forma de medir la luz debido a que las técnicas de medición actuales son obsoletas (Lang. D, 2011), (Bylund, L, 2012).

4.1.1 Bombillas biodinámicas inteligentes

Actualidad en el mercado

1. Hue

Philips siempre ha estado entre los líderes del comercio de bombillas en todo el mundo, por lo que no extraña que sea una de las empresas más interesadas en adaptarse a los nuevos tiempos. El resultado del mentado interés es la Philips Hue, una de las soluciones más sólidas en lo que iluminación automatizada para el hogar respecta. La Philips Hue es más que una simple bombilla que se puede conectar a los smartphone. Podemos programar los ciclos de luz y hacer que la iluminación mengue lentamente, el resultado es una adaptación más cómoda a la oscuridad para nuestros cerebros, con lo que podremos conciliar el sueño más fácilmente.

Al tratarse de una bombilla LED multicolor, Philips también ha pensado en usar diferentes configuraciones de colores para que la luz sea más útil



Imagen 31: Lámparas biodinámicas GE Link.

Fuente: <http://www.gelinkbulbs.com/>



Imagen 32: Lámparas biodinámicas WeMo Belkin

Fuente: <http://www.belkin.com/us/p/P-F5Z0489/>

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural según la actividad que estemos realizando. Se trata de una de las primeras bombillas LED inteligentes que salieron al mercado y tienen algo de ventaja respecto a su funcionalidad con otros fabricantes.

2. GE Link

General Electric es otra de esas empresas a las que no le falta experiencia en el mercado de las bombillas. Las GE Link no cuentan con todas las funciones avanzadas de la competencia, pero cumplen con lo básico y son un buen sistema de iluminación automatizado que puedes controlar desde el smartphone al que le puedes programar ciclos.

3. Belkin WeMo LED Lighting

Belkin es de las casas que más se interesan por la integración del hogar automatizado y su alternativa para la iluminación es bastante interesante. Se trata en definitiva de uno de los sistemas más sencillos que sigue más los pasos de General Electric que los de Philips, se trata de una solución a tomar en cuenta para aquellos que quieren algo económico y busquen una alternativa a GE.

4. Alba- Stack

La primera bombilla inteligente que se adapta a tu entorno. Una bombilla que se apaga automáticamente cuando sales de la habitación no es nada nuevo. Lo mismo se extiende a una bombilla que cambia el color de su luz.



Imágen 33: Alba Stack
Fuente: <https://stacklighting.com/>

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

Pero que detecte a qué hora nos vamos a la cama, cuándo nos encontramos trabajando, y el momento en que deseamos ver una película, es algo que sólo la bombilla inteligente Alba puede hacer, de acuerdo a sus creadores.

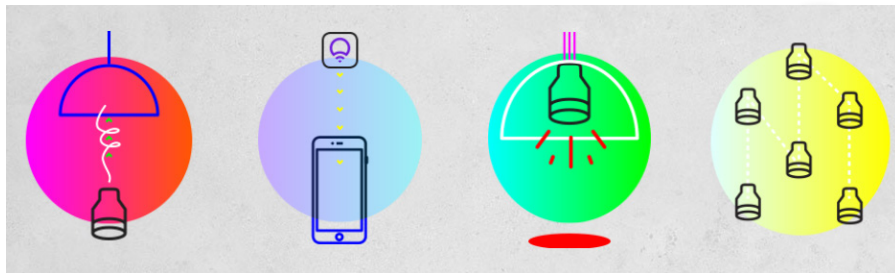
Al saber cuánta luz natural hay en una habitación, Alba tiene la capacidad de modificar el tipo y la intensidad de su luz, lo que a su vez representa una reducción en el consumo ubicada entre el 60 y el 80 por ciento, si se la compara con otras luces LED. A esto se suma la ejecución de algoritmos que reconocen patrones en las actividades del usuario, una vez más afectando el comportamiento de la luz. De ser necesario, el usuario puede realizar cierta sintonía fina en los parámetros de la bombilla, con una aplicación dedicada.

5. Lifx

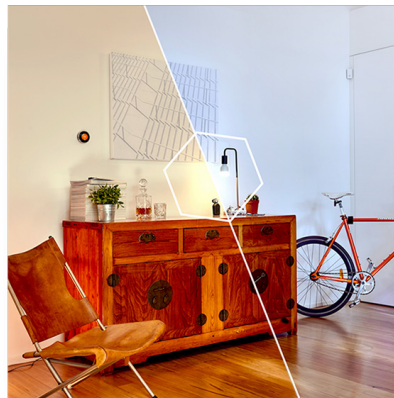
LIFX es una bombilla LED de bajo consumo, preparada para Wi-Fi y conectada a Internet, que puedes controlar con un smartphone o tableta con iOS o Android. Con la aplicación LIFX® puedes encender y apagar bombillas, regularlas, ajustar el brillo y el color, programar distintos ambientes y programar temporizadores de activación y reposo. Con esta aplicación puedes controlar bombillas individuales, estancias o toda la casa. LIFX también funciona como una bombilla normal apagándola y encendiéndola con un interruptor convencional.

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

- La LIFX es una bombilla inteligente de bajo consumo de tipo LED con conectividad WiFi que puede ser controlada desde terminales iOS y Android mediante una aplicación gratuita.
- Tiene una duración de hasta 40.000 horas/25 años, con lo que no tendremos que preocuparnos demasiado por cambiarla.
- No es necesario contar con ningún tipo de accesorio extra: quitamos nuestra bombilla de siempre y colocamos una LIFX en su lugar. En estos momentos disponen de tres tipos: Bayonet cap, Edison screw y Downlight.
- Desde la aplicación para iOS y Android podremos controlar por separado todas las LIFX que hayamos instalado en casa y ajustar tanto la intensidad como el color, pero también podremos crear grupos de bombillas. Flexibilidad máxima.
- Podemos configurarlas para que por las mañanas se enciendan gradualmente de forma automática, lo cual es perfecto para despertar de nuestro sueño de manera natural y sin sobresaltos.



Imágen 34: Composición de efectos producidos por la LIFx
Fuente: <http://www.lifx.com>



4.2 Ilusiones visuales

Un intento de simular la luz del día en un espacio iluminado artificialmente es también un intento de engañar al cerebro. Con el uso de la luz, queremos convencer a la mente de que ya no está encerrado en un espacio, pero tienen un fácil acceso al exterior. Las ilusiones de luz no son algo innovador, los artistas les han jugado trucos a la mente desde hace siglos. Haciendo que los objetos parezcan lo que no son, o hacer que un objeto estático parezca que se mueve, han sido logradas con éxito porque se han hecho utilizando la luz. ¿Podemos usar ilusiones para engañar a la mente a creer que la luz natural está entrando en un espacio, mediante el uso de la iluminación artificial?

Las diferencias visuales entre la luz natural y la luz artificial va más allá de las especificaciones técnicas de la luz. La luz natural de forma difusa ilumina las superficies de manera más uniforme que la luz de una bombilla desde un solo punto de origen. La luz natural va más allá, actuando en dirección horizontal y vertical. La iluminación eléctrica ilumina normalmente en una dirección determinada, como resultado se iluminará de forma proyectada sobre una superficie y ésta tiene una perspectiva diferente a la luz del día (Rybakken, D., 2010).

Para crear la sombra de un objeto que está iluminado por la luz natural, en un espacio iluminado artificialmente, la proyección de la luz no puede ser



Imágen 35: CoeLux® 45 HC
Instalación en Vilnius Airport (LT).
Foto: Ekspobalta

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural en un solo ángulo. Daniel Rybakken descubrió esto durante la creación del “efecto subconsciente de la luz natural”. En sus pruebas trató de proyectar luz sobre el suelo de la misma forma que se produciría si la luz proviniera de una ventana.

Sin embargo, con una sola fuente de luz, la luz se expandió en ángulo sobre la fuente, a diferencia de la luz natural que es paralela. Rybakken resolvió este problema mediante el uso de múltiples fuentes de luz para crear un rectángulo perfecto, pero al colocar un objeto entre la luz y la superficie, la sombra del objeto se expandió, y un espectador entendería inmediatamente que la fuente de luz es artificial (Rybakken, D., 2010).

Se dio cuenta de que el único punto de origen de la luz siempre debe emitir luz en ángulo. En lugar de tratar de forzar la posición de las luces de iluminar de forma recta, se utiliza un proyector para emitir luz desde arriba, con una imagen de la sombra ya dibujado en el. Es discutible si aparecería el mismo resultado si la luz proviniera de una superficie mayor.

Sin la calidad adecuada de la luz, la iluminación artificial nunca se sentirá como la luz natural (Hashmi, K., 2006). La reproducción del color no necesariamente tiene que ser perfecto para engañar a la mente. En cuanto a la tecnología reciente de las fuentes de luz, es evidente que la iluminación artificial mejora cada día, y no es ser realista pensar que podríamos ser capaces de simular la luz natural un día (Bylund, L., 2012).



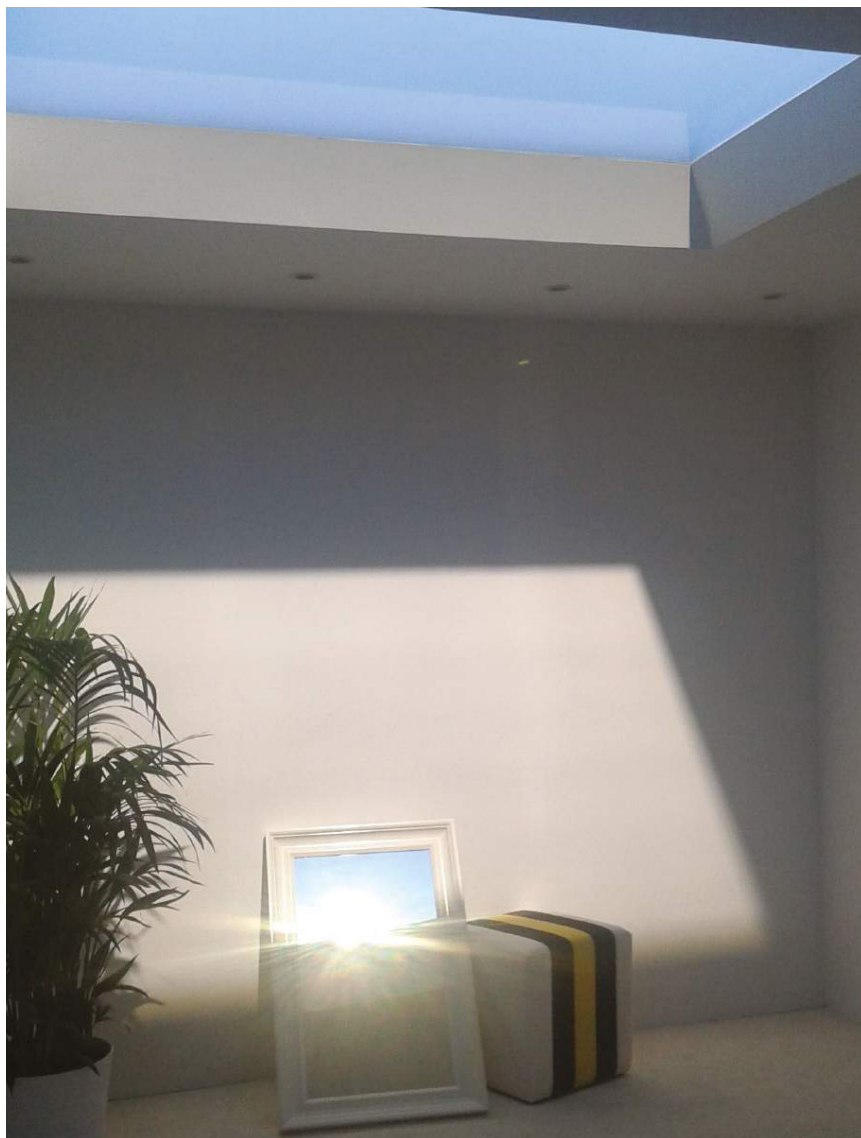
*Imágen 36: CoeLux® 45 HC
Instalación en Bang&Olufsen showroom Ausros Vartu g.5/Pasazo skg. Vilnius
Foto: Ekspobalta*

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

En cuanto a los diseños arquitectónicos e interiores actuales, es evidente que la conciencia sobre la luz natural ha crecido en la última década. Las ventanas son más grandes, la conexión con el exterior está más cerca. Sin embargo, esta conexión se interrumpe cuando no hay luz natural, y tenemos a la oscuridad en el otro lado de la ventana. En lugar de una conexión abierta con la naturaleza, la ventana es un espejo que refleja su entorno más cercano. (Veitch, J., Farley, F., 2001).

Para simular la luz natural en espacios interiores, la luz debe provenir de la misma fuente que la luz natural: el exterior. Si utilizamos el efecto que provoca la luz natural que entra por las ventanas, creando así falsas ventanas en lugar de huecos en el techo, es una forma más eficaz de persuadir a la mente humana de que lo que ve es luz natural y no luz artificial (Matusiak, B., 2012).

El Lighting Research Center de Nueva York escribe que las personas que trabajan en un sótano o en una oficina sin ventanas, son más propensos a colgar imágenes de la naturaleza en las paredes. El contacto con la naturaleza es generalmente estimulante y calmante para la mayoría de la gente (Veitch, J., Farley, F., 2001). La liberación de los límites de un espacio cerrado, hace que un espacio parezca más grande y da la sensación de que hay algo más allá de las paredes interiores. la sensación de tener luz natural puede ser tan importante como la cantidad de iluminación real y la intensidad del color en una ilusión visual exitosa.



*Imagen 37: CoeLux® 45 HC
Instalación en Dubai Building Healthcare Fair Junio 8-10, 2015
Foto: CoeLux®*

Con iluminación natural simulada en una habitación de hotel, controlada por el huésped, el desfase en el horario de dormir podría ser aliviado mediante el control del espectro de luz. Ser capaz de controlar los alrededores a menudo ayudan a la gente a relajarse y sentirse más cómodo (IMI, 2012).

4.2.1 Simulación de iluminación natural

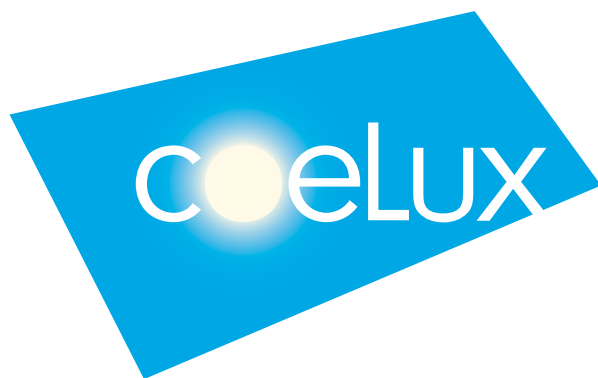
Presentamos instalaciones de diseño de iluminación diferentes que tratan de eliminar los límites perceptuales de un espacio interior.

1. Coelux

CoeLux tal vez sea el desarrollo en iluminación de interiores más revolucionario del siglo XXI. Prácticamente todos los entornos podrían verse beneficiados, en especial aquellas instalaciones dedicadas a la salud y la rehabilitación. La compañía utiliza la nanotecnología para producir lucernarios LED en los techos que la gente no puede distinguir de un lucernario real bajo un cielo soleado.

COELUX recrea en el interior los efectos ópticos y físicos de la luz natural, simulando la difusión y transmisión de la luz solar en la atmósfera. Materiales nanoestructurados, de tan solo unos milímetros de grosor, recrean todo el proceso de dispersión de Rayleigh que se produce en la atmósfera.

COELUX ha sido diseñada centrándose en la industria médica, pero también



Experience the Sky



Imagen 38: CoeLux® es un sistema óptico basado en nano tecnología para reproducir artificialmente la luz natural y la apariencia visual del sol y el cielo.

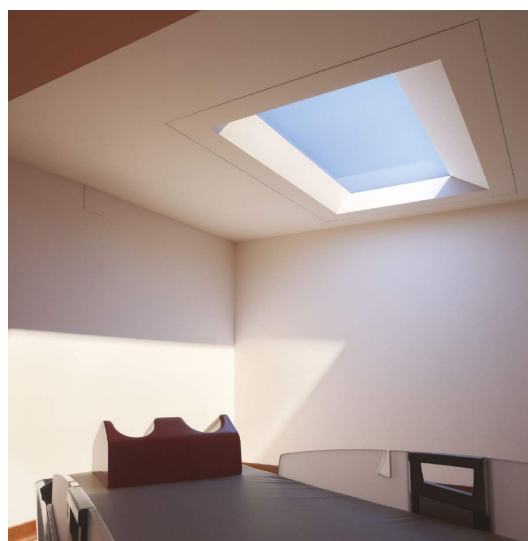
Foto: CoeLux®

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural puede aplicarse a otros entornos. También podrán beneficiarse de esta tecnología los residentes en los países más alejados del ecuador, cerca del Ártico o el Antártico, que disponen de muy poca luz natural durante largos periodos a lo largo del año.

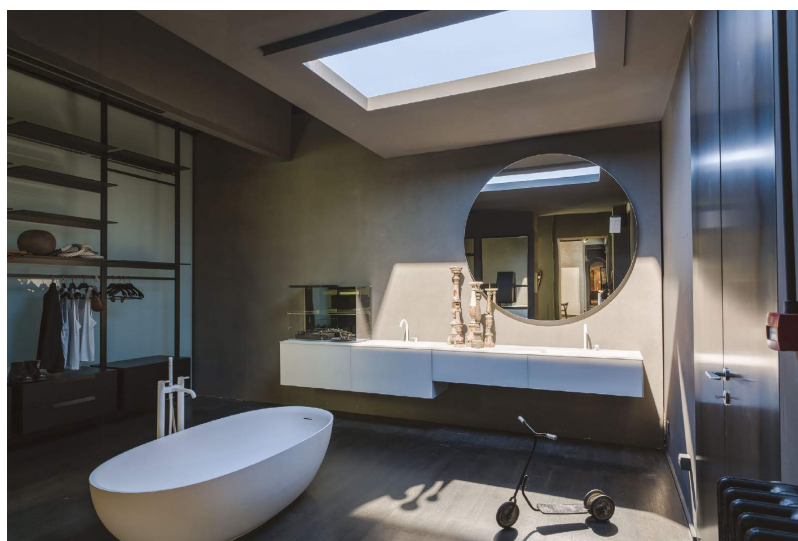
Según Paolo Di Trapani, coordinador del proyecto y físico en la Universidad de Insubria en Como, Italia:

“Con COELUX puede experimentar cielos soleados en cualquier momento y en cualquier lugar. Es difícil describir los efectos positivos e inspiradores de COELUX debido a la percepción de espacio infinito que produce la tecnología. De hecho, las pruebas obtenidas en el transcurso del proyecto señalan que las personas claustrofóbicas se sienten felices y relajadas cuando están expuestas a la luz de COELUX, incluso cuando permanecen en una habitación pequeña y sin ventanas por un periodo de tiempo prolongado.”

En un escenario donde todos los esfuerzos científicos e industriales van ligados al desarrollo de iluminación de bajo consumo con el mismo espectro del sol, Coelux propone mediante el desarrollo de materiales nano compuestos, incorporarlos en luminarias y así recrear la misma atmósfera de luz con todas las variedades tonales que transmitiría la luz del sol, incluso el tono azulado debajo de un cielo difuso.



Imágen 39: CoeLux® 45 HC
 Instalación en Hospital Humanitas.
 Departamento de Gamma Knife Radiosurgery,
 Milan (IT). Sistema de luz artificial encendido y
 apagado. Foto: Michael Loos



Imágen 40: CoeLux® 45 HC
 Instalación en Bof Showroom, Via Solferino 19, Milan (IT). Sistema
 apagado y encendido. Foto: Ezio Manciuca



Imágen 41: CoeLux® 45 HC

Instalación en SPazio_INnovazione, Via Cerva 25, Milan (IT). Sistema encendido durante la noche.

Foto: Michael Loos



Imágen 42: CoeLux® 45 HC
Instalación en Hospital Humanitas. Departamento de Gamma Knife Radiosurgery, Milan (IT). Sistema de luz artificial apagado y encendido.
Foto: Michael Loos





CoeLux® 45 LC

Especificaciones

Ambiente: Interiores

Tipo de instalación: Falso techo

Altura de falso techo: 2.20 m - 2.60 m

Dimensiones: 2.27 x 1.67 x 6.66 m

Peso: 300 kg (660 lb)

Área sugerida por unidad: 20 m² (215 ft²)

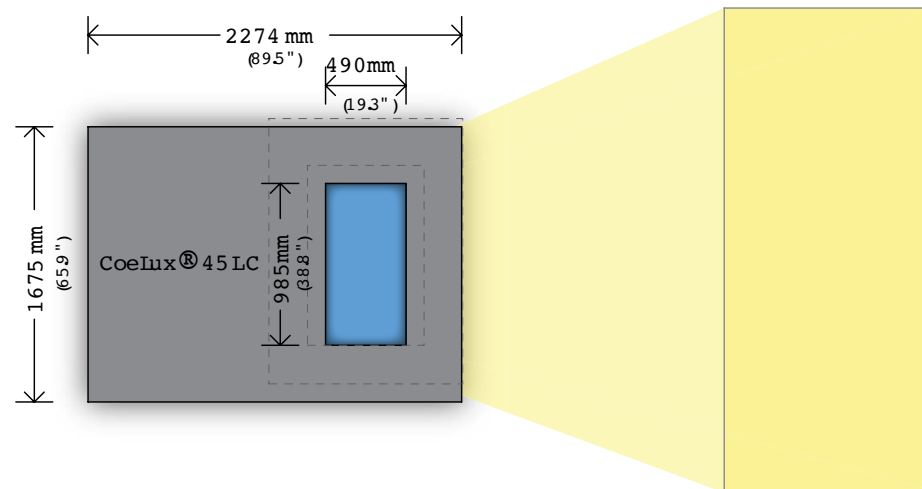
Tipo de Fuente: LED (no regulable)

Consumo máximo (W): 350

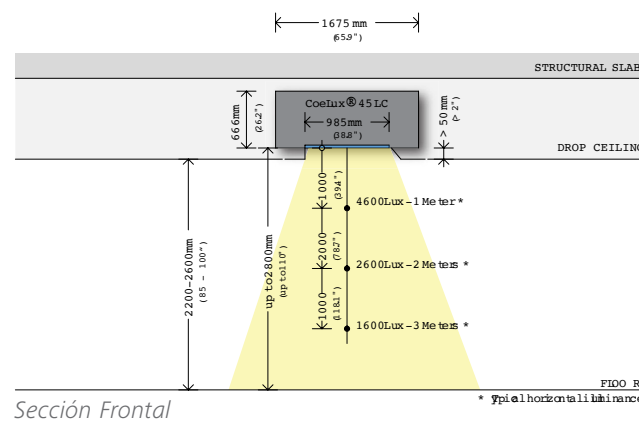
Consumo de energía típico (W): 300

Power input: 230 V~ 50/60 Hz

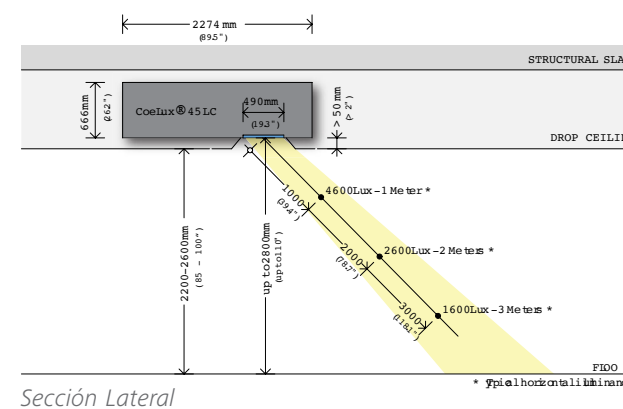
Garantía: 2 años



Planta

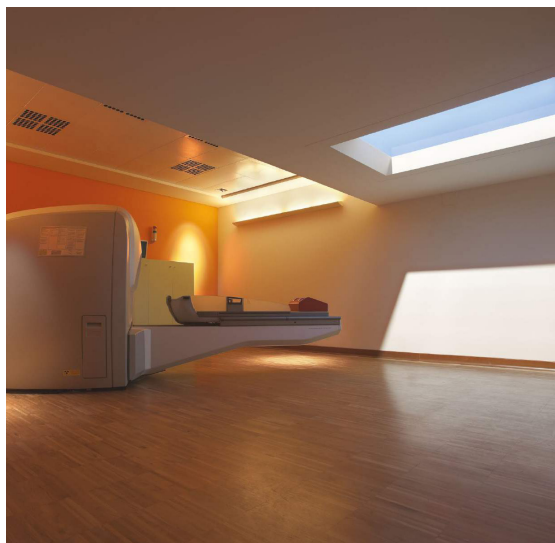


Sección Frontal



Sección Lateral

Imágen 43: CoeLux® 45 LC
Especificaciones técnicas
Fuente: www.coelux.com



CoeLux® 45 HC

Especificaciones

Ambiente: Interiores

Tipo de instalación: Falso techo

Altura de falso techo: 2.20 m - 3.20 m

Dimensiones: 3.65 x 2.27 x 9.50 m

Peso: 300 kg (660 lb)

Área sugerida por unidad: 20 m² (215 ft²)

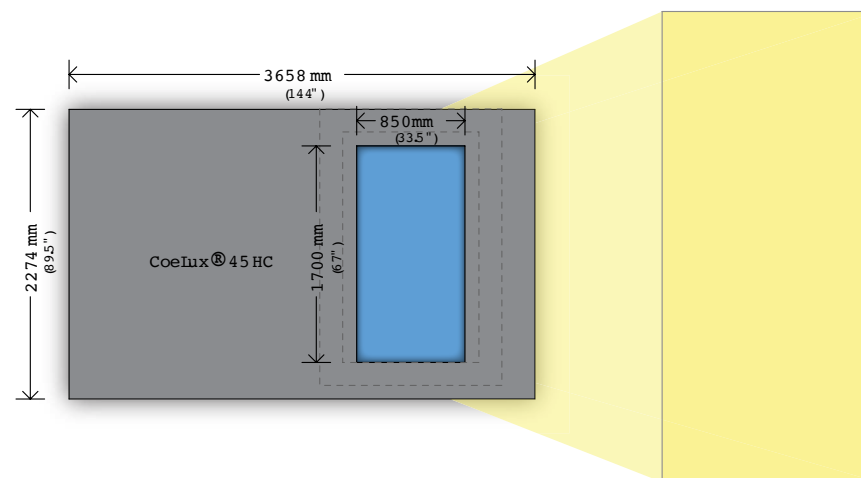
Tipo de Fuente: LED (no regulable)

Consumo máximo (W): 400

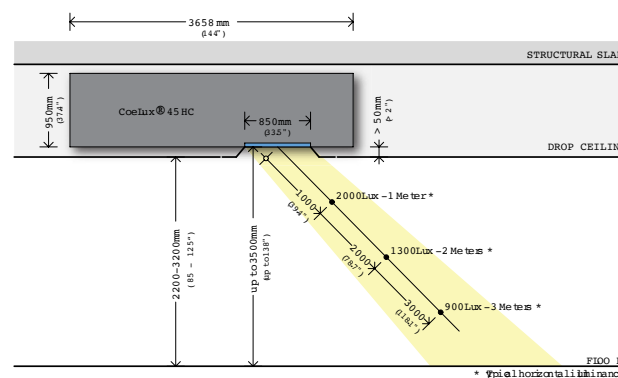
Consumo de energía típico (W): 350

Power input: 230 V~ 50/60 Hz

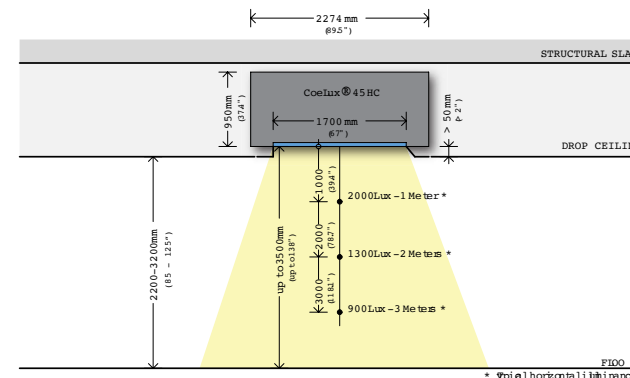
Garantía: 2 años



Planta



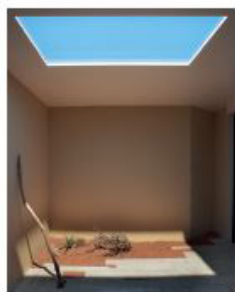
Sección Frontal



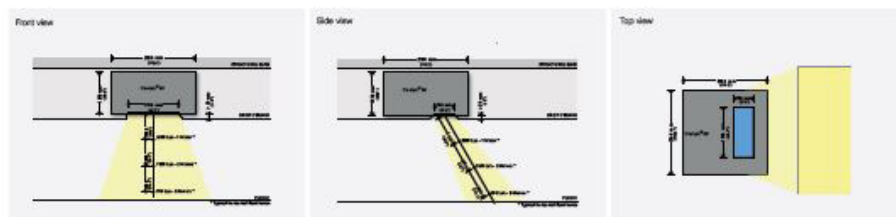
Sección Lateral

Imágen 44: CoeLux® 45 HC
Especificaciones técnicas
Fuente: www.coelux.com

CoeLux 60



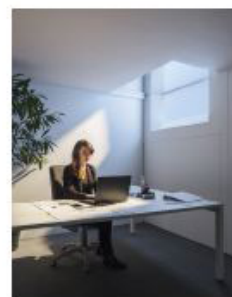
For those who prefer the more dramatic effect of tropical light, CoeLux® 60 offers an additional solution for a skylight featuring a more vertical sunlight, which guarantees the minimum level of glare. CoeLux® 60 features a ca 1.2 - square meter window with a spotlight-effect beam projected on the floor rather than the wall. The CoeLux® 60 is designed for ceiling installation.



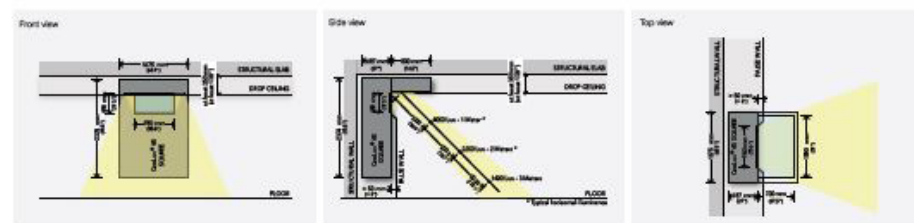
Specification features:

Environment of use	Indoor	Max power consumption (W)	300
Type of installation	Drop ceiling	Typical power consumption (W)	270
Device dimensions	2900 x 2950 x 1540 mm (114.2 x 112.6 x 60.6")	Power input	100-240 V~ 50/60 Hz
Weight	300 kg (770 lb)	Warranty period	2 years
Sky-light size	1700 x 700mm (67 x 27.6")	MOQ	8 pos.
Suggested area for a unit	Up to 20 m² (215 ft²)	Production Lead Time	3 months
Type of source	LED (not dimmable)	Part number	74-00016-01

CoeLux 45 SQUARE



The CoeLux® 45 SQUARE is designed for an area with a ceiling as low as 2.7 meters or below, and it offers the opportunity to be installed on the wall creating a make-believe square window with an area of ca 1 square meter, artificially recreating natural light and a view of the sky and the sun, creating the sensation of infinite space. The CoeLux® 45 SQUARE is designed for wall installation.



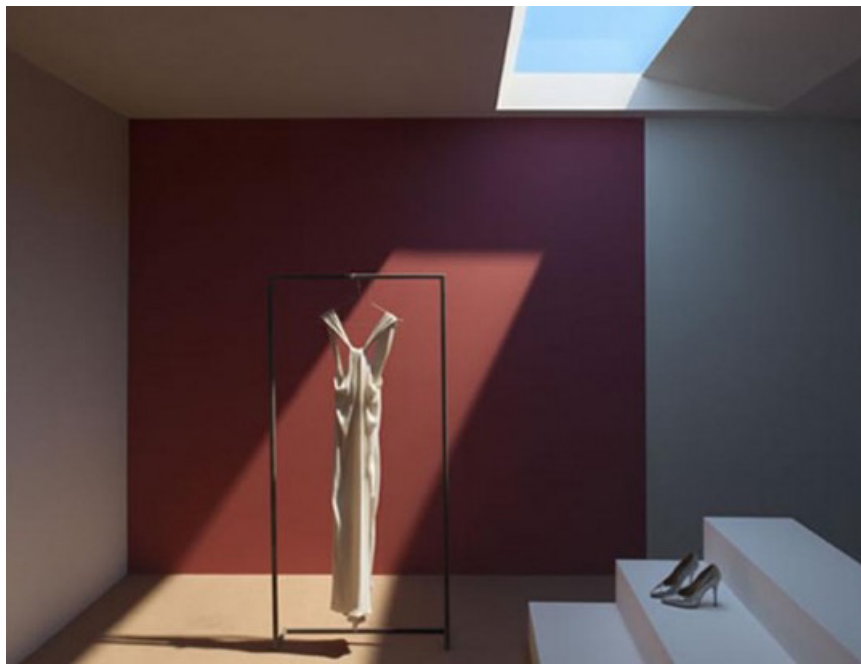
Specification features:

Environment of use	Indoor	Type of source	LED (not dimmable)
Type of installation	Wall	Max power consumption (W)	300
Device dimensions	687 x 1675 x 2374 mm (27 x 65.9 x 93.5")	Typical power consumption (W)	270
Overall dimensions	1457 x 1675 x 2374 mm (27 x 65.9 x 93.5")	Power input	100-240 V~ 50/60 Hz
Weight	300 kg (660 lb)	Warranty period	2 years
Perceived sky-light size	980 x 980mm (38.6 x 38.6")	Part number	COELUX®45SQ_UL
Suggested area for a unit	Up to 20 m² (215 ft²)		

Imágen 43: CoeLux® 60 y 45 square

Especificaciones técnicas

Fuente: www.coelux.com



La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

Realizando esto, se pueden conseguir iluminaciones de atardeceres, días claros o lluviosos que pueden ser utilizados en apartamentos, lugares de trabajo, centros comerciales, centros deportivos, estaciones de trenes a cualquier hora del día. CoeLux exhibe como la tecnología nos provee una perspectiva única para un entendimiento más profundo de la conexión existente entre arte, arquitectura y fotografía en nuestra experiencia diaria con la luz.

El profesor Paolo di Trapani, fundador y CEO, explica cómo se podría transformar la arquitectura y la experiencia humana de los espacios interiores.

Entrevista a Paolo di Trapani, creador de CoeLux

Link: World Economic Forum's 2015 class of Technology Pioneers.

<https://www.weforum.org/agenda/2015/08/light-fixtures-that-mimic-natural-light/>

5 de Agosto 2015

¿De qué manera CoeLux se diferencia de otros dispositivos de iluminación que tratan de imitar la luz natural?

En esencia, creando también la sensación de espacio. Cuando la gente mira el lucernario CoeLux, tienen la sensación de que están buscando hacia arriba a través de decenas de kilómetros de espacio.

Cuando hemos demostrado por primera vez el producto en una exposición, nos dimos cuenta de que las personas que entraron en

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural
 nuestro stand a menudo miraban a su alrededor preguntándose qué producto estábamos demostrando. Cuando le indicábamos que era el lucernario, simplemente asumieron que era una apertura hacia el exterior. Hemos tenido que trabajar duro para convencerlos de que no era de hecho el cielo real, recordándoles que estábamos en el interior de un centro de exposiciones sin ventanas.

¿Cómo se crea esta sensación de mirar hacia el espacio?

La luz natural que experimentamos al aire libre es el resultado de las ondas del sol direccional que pasan a través de la atmósfera terrestre. Interactúa con las moléculas de aire, las gotas de agua u otras diversas partículas en la atmósfera, difuminando la luz que nos alcanza y cambiando su calidad de muchas maneras diferentes.

Lo que hemos hecho es entender los procesos a los que se somete la luz del sol a medida que pasa a través de la atmósfera, y volver a crear la misma física en una escala más pequeña usando nanopartículas. Los lucernarios CoeLux implican un proyector de luz LED que imita el sol, una capa de materiales utilizando la nanotecnología para hacer a esta luz lo mismo que le hace la atmósfera a la luz solar, y un sistema óptico para mejorar aún más la percepción de la profundidad. En efecto, estamos recreando 10 kilómetros de la atmósfera de la Tierra en una capa de menos de un metro.



Imágen: CoeLux® 45 HC
 Instalación recreando el efecto del Sol
 Foto: Michael Loos

¿Cómo surgió la inspiración?



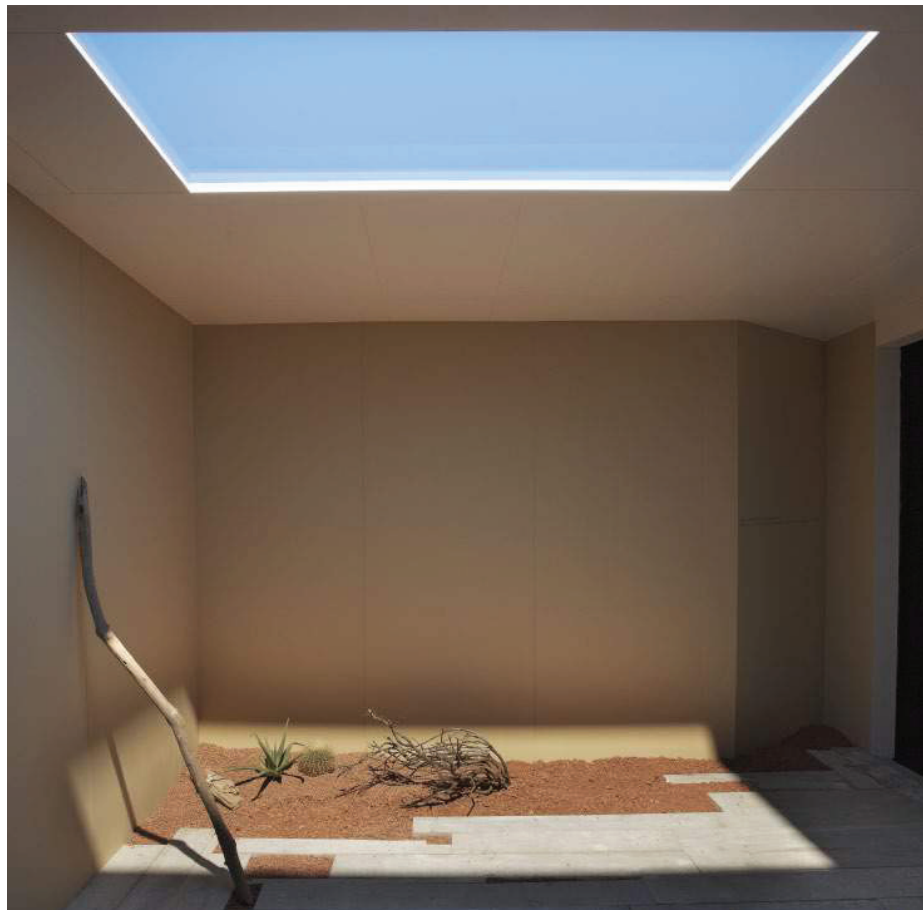
Hace unos 15 años me pidieron que diera una charla a una escuela primaria acerca de la luz, y en la preparación compré un libro maravilloso llamado “Luz y color en el aire libre” por un astrónomo llamado Marcel Minnaert. En él describe la física detrás de los fenómenos de iluminación al aire libre, que van desde los muy conocidos tales como el arco iris, hasta los menos conocidos, tales como una línea delgada y brillante que puede aparecer cuando las sombras de dos ramas de los árboles se superponen. Él describe cómo la luz interactúa con niebla, con varios tipos de nubes; el libro contiene más de 200 tales observaciones.



Imágen: A man walks past the ice encrusted woods in Earl Bales Park following an ice storm in Toronto, 2013. Comparación con lucernario Coelux
Fuente: Gary Hershorn

Me fascinó tratar de capturar estos fenómenos en mis propias fotografías, y frustrado cuando a menudo no podía tener éxito. Como profesor de óptica, ¿cómo no fui capaz de ver estas cosas? Así que me puse a recrear el efecto en mi laboratorio. Y entonces llegó un día que cambió mi vida. Después de haber visto estos efectos en el laboratorio, de repente empecé a ver el aire libre, y no podía entender cómo había estado ciego a ellos anteriormente. Y no era sólo en la naturaleza que veía las cosas de forma diferente: empecé a ver cosas en el arte del Renacimiento que anteriormente no había apreciado. Sólo puedo compararlo con haber sido ver el mundo en blanco y negro, y de repente ver colores.

Hemos desarrollado una exposición para demostrar estos efectos, y



Imágen 45: CoeLux® 45 LC
Foto: Michael Loos

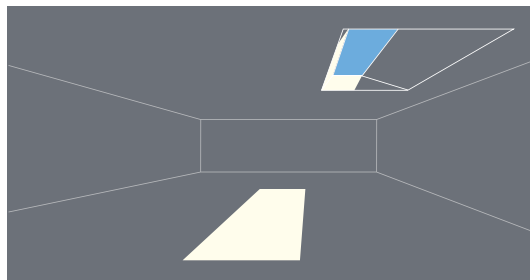


Imágen 46: CoeLux® 45 HC
Foto: Michael Loos

60°

Tropical

Brillante, luz fría
alto contraste



45°

Mediterráneo

Medio and
balanceado.

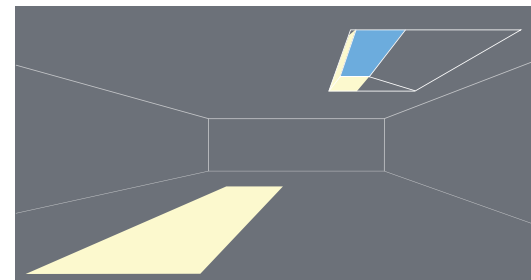
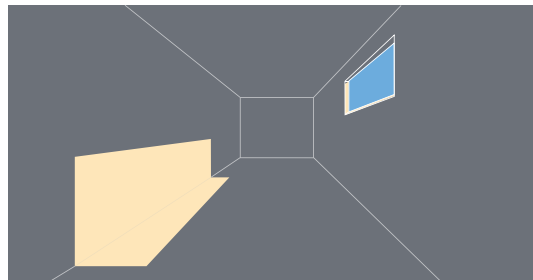




Imagen 47: CoeLux® Ventana
Foto: Michael Loos



La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural miles de visitantes informaron que experimentaron la misma sensación que tuve - una sensación de haber vuelto a aprender el lenguaje de la luz, de volver a conectar con el cielo. En este punto, en 2007, empecé a pensar: ¿y si pudiéramos tomar las técnicas que entraron en esta exposición, y utilizarlos para crear un producto?

¿Cómo financió el desarrollo de la tecnología?

Junto con algunos de mis estudiantes en la Universidad de Insubria, en Como, Italia, creamos una empresa que nos ha permitido acceder a fondos de la Unión Europea. En total, recibimos alrededor de 10 millones de euros de la UE, lo que nos permitió financiar el desarrollo del producto hasta el punto en que los inversores privados comenzaron a venir a bordo.

¿Dónde se ve utilizando esta tecnología?

Curiosamente, cuando hicimos un plan de negocios, investigamos la cuota del mercado de la iluminación a través de diferentes áreas - residenciales, de oficinas, hostelería, sanidad, transporte, y así sucesivamente; y cuando empezamos a exhibir el producto y recibir consultas, se encontró que las investigaciones estaban llegando casi exactamente en proporción directa a la división del mercado. Esto nos mostró que hay un deseo por el producto en todos los contextos donde la gente necesita luz.

El primer mercado al que le estamos dando prioridad es la asistencia sanitaria. En los hospitales, algunos equipos tiene que estar en sótanos, tal vez porque es muy pesado o produce la radiación que necesita ser protegida por muros de protección. Y para los pacientes que ya no se encuentran bien y se sienten estresados acerca de someterse a un tratamiento, tener que bajar a un sótano puede aumentar la sensación de opresión. Esta es quizás la situación en la que una sensación de luz natural puede ser más beneficiosa.

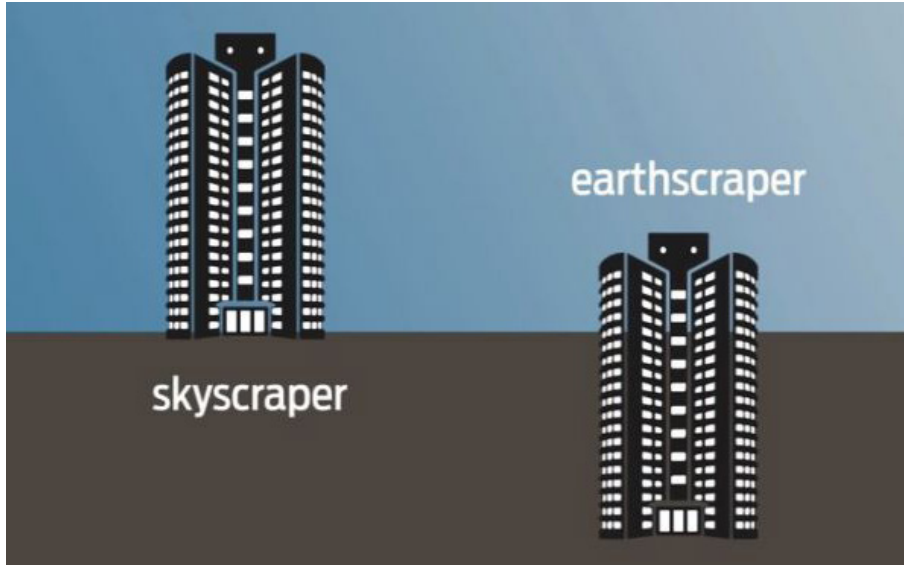
Hay muchos otros contextos en los que puede ser arquitectónicamente difícil llevar luz natural: edificios de oficinas, centros comerciales, aeropuertos, aviones, trenes subterráneos, los ascensores, los spas y salas de reuniones que se encuentran en los sótanos de los hoteles, y, por supuesto, la sótanos de las casas. Como era de esperar teniendo en cuenta la temprana etapa del producto, todavía es bastante costoso de producir, pero estamos comprometidos con el desarrollo de una manera tal que sea accesible para todo el mundo, no sólo para los muy ricos.

¿Puede ser adaptado a las edificaciones existentes, o es más adecuado para las nuevas estructuras?

El primer sistema que produjimos era bastante grande, requiriendo un metro de profundidad. Pero ya hemos conseguido que nuestro segundo



Imágen 47: CoeLux® Ventana
Foto: Michael Loos



Imágen 47: Construcción subterránea
Foto:Coelux.com

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural sistema ocupe solo 65 centímetros, y estamos trabajando en un tercer sistema, que será de alrededor de 50 centímetros, sin comprometer la calidad del efecto. Entonces se convierte en viable una adaptación posterior en cualquier edificio normal con alrededor de 3 metros de espacio vertical para trabajar. Lo que se pierde en el volumen físico real, se gana en volumen percibido; si se encuentra en una habitación con una CoeLux y una luz artificial normal, el cambio a la luz artificial le hace sentir el espacio mucho más pequeño.

Y cuando se piensa en lo que los arquitectos podían hacer en el diseño de nuevos edificios con esta tecnología en mente, abre muchas nuevas posibilidades.

¿Qué opina en cuanto al futuro de construcción subterránea?

Creo que la arquitectura funciona cuando se nos da la sensación de estar conectado con el exterior, porque eso es lo que nos hace sentir como en casa, dentro del universo. Piense en la forma en que los seres humanos evolucionaron. Tenemos una sensación de comodidad y confianza a medida que avanzamos a través del mundo con la luz del día: percibimos la profundidad y la distancia en nuestro entorno de forma natural, y nos sentimos capaces de navegar en nuestro medio ambiente. Por el contrario, en contextos evolutivos, estar atrapado en un espacio cerrado habría sido una experiencia mortal, ya que nos dejaría vulnerables a los depredadores. Por lo que se puede esperar que la experiencia de estar en un espacio cerrado iluminado por luz artificial

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural sea estresante, mientras que la experiencia de sentirse conectado al exterior podría ser un alivio.

¿Existen estudios demostrado este efecto?

Se realizó un estudio con 200 personas donde comparamos a un grupo sentado en una habitación con luz artificial normal y a un grupo sentado en una habitación idéntica con un lucernario CoeLux, y probamos una serie de parámetros psicológicos, fisiológicos y biológicos. Las diferencias fueron inequívocas. Los participantes en la sala iluminada artificialmente habían aumentado de manera importante los niveles de ansiedad, mientras que los de la sala CoeLux eran completamente normales.

Creo que es fundamental para nuestro sentido de conexión con el universo que la luz que entra a nuestros ojos se sienta como que proviene del Sol. El hecho de que CoeLux sea un lucernario le suma al efecto: nos pasamos gran parte de nuestras vidas mirando hacia abajo, en la pantalla del ordenador o lo que sea, mientras que mirando hacia arriba nos hace sentir conectados con el universo. Y es maravilloso encontrar que la tecnología nos pueda dar esa sensación en lugares en los que de otra manera no la tendríamos.

Type of reaction	Feedback	Estimated impact area
Stupor	It's incredible, it's like a magic. It is NOT a real window?	Mood improvement.
Comfort	It's same as staying in sunshine	Wellness & relax Wellbeing Health recovery Health therapy Work comfort Work productivity
Sense of safety	It's like being in the open	Stress therapy Lighting of underground/dim areas
Interest for own use / purchase	I want one in my home/shop/hospital...	Business exploitation Mood improvement SAD therapy Health recovery Health operators wellness
Interest in technology	Really new concept in lighting. May change architectural lighting. May change architecture conception. It's fantastic for use in basements, large open spaces, SPAs. Gyms, etc. Mostly interesting in tourism applications, hospitality, luxury real estate	Business exploitation New architectures New interior design

Tab. 3: Type of reaction and feedback

Estudio realizado sobre las reacciones de las personas en las exhibiciones de CoeLux

Fuente: Report on comfort and wellbeing measurements, Markus Canazei, Bartenbach GmbH., Austria Elena Martinelli, Insubria University, Italy

Autor: Profesor Paolo di Trapani, fundador y CEO, CoeLux

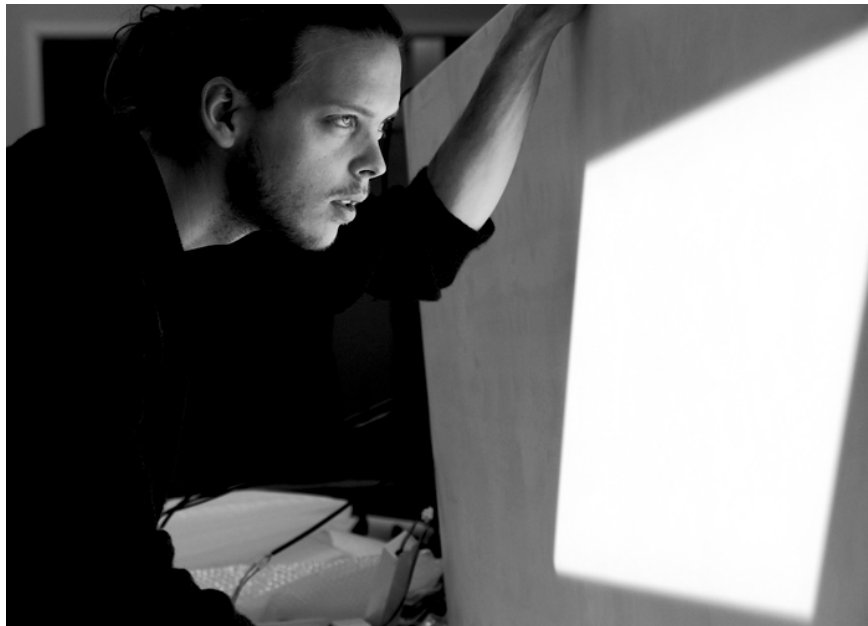
2. Efecto subconsciente de Daniel Rybakken

“ La luz natural da al espacio una sensación de libertad, mientras que la falta de ella te hace sentir cerrado y solo ” Daniel Rybakken.

Daniel Rybakken se inspiró para trabajar con la luz natural después de analizar su dormitorio infancia, donde se dio cuenta de las diferentes percepciones que la habitación tenía durante el día, a diferencia de la noche. Cuando la luz natural entra en un espacio que crea una sensación de espacio amplio, crea una sensación de libertad. Cuando se quita la luz del día ya no se consigue esta sensación positiva. La habitación se siente más pequeña, se siente cerrada y solo.

Daniel Rybakken se interesa por la calidad de la luz y cómo las personas la perciben. Se concentra en cómo volver a crear artificialmente la apariencia y el efecto subconsciente de la luz del día. Su idea es crear un sentimiento inconsciente de una sala amplia, a través de la ilusión de la luz natural. Sus diseños hacen que la gente sea consciente de la sensación que crea la luz natural (Szita, J., 2011).

En lugar de diseñar una bombilla, se centra en la forma en que la luz incide en una superficie a través de una ventana, para crear una luz propia (Rybakken, D., 2012). Sus estudios sobre cómo la luz del sol entra en una ventana, y las reflexiones cuando la luz incide en las paredes y objetos, le ha dado el conocimiento y la inspiración para simular el mismo efecto.



*Imágen 48: Daniel Rybakken : Daylight entrance, Stockholm.
Foto: Daniel Rybakken*

Muchos diseñadores se centran en la creación de lucernarios falsos con un espectro que simule al de la luz natural, sin embargo, si nos encontramos en medio de un edificio que ya sabemos que hay un piso por encima de nosotros, y por lo tanto se sabe automáticamente que la luz que vemos en el techo no es real. Nuestro subconsciente nos dirá inmediatamente que algo está mal. Estamos acostumbrados a que la luz natural entre por una ventana, así que si observamos una pared que parece que tiene una ventana iluminada, la mente no reacciona inmediatamente con la idea de que esta sea falsa (Matusiak, B., 2012).

“La entrada de la luz natural” (Rybakken, D., 2010) realizada en Estocolmo utiliza los elementos y las teorías de los trabajos anteriores de Rybakken, que aquí fue incorporado directamente en la arquitectura (Etherington, R., 2010). La obra se encuentra en la entrada de un edificio de oficinas. Ni la entrada ni la escalera tiene ninguna conexión con la luz natural. El objetivo era reproducir la sensación perceptual espacial positiva de la luz solar (Rybakken, 2012).

Las paredes están cubiertas con un material de superficie sólida, se realizan huecos de fresado CNC en unos paneles a los cuales se le añaden una iluminación trasera con LEDs en la parte trasera. La instalación consta de más de 6,000 LEDs y continúa a través de tres niveles (Szita, J., 2011).



*Imágen 48: Daniel Rybakken : Daylight entrance, Stockholm.
Foto: Daniel Rybakken*



“La entrada de la luz natural”, da la impresión de que la luz del mediodía brilla a través de una ventana y la refleja sobre las paredes (Rybakken, 2012). En la simulación de la luz natural, la ilusión conseguida del día puede ser tan importante como los niveles de iluminación reales.

El sótano se siente libre, en lugar de escondido debajo de la tierra, con una estrecha relación con el exterior. Por otro lado, la luz no es dinámica, por lo que uno no sentiría el paso del tiempo como lo realizaría naturalmente el sol.



*Imágen 49: Composición Daniel Rybakken : Daylight entrance, Stockholm.
Foto: Daniel Rybakken*



Conclusiones**Parte Teórica**

(1) La luz natural da al espacio una sensación de libertad, mientras que la falta de ella te hace sentir cerrado y solo.

(2) La reproducción del color no necesariamente tiene que ser perfecto para engañar a la mente.

(3) Un nivel de iluminación perfecto variará a lo largo del día, que debe ser considerado cuando se trata de simular un ambiente natural.

(4) Para crear sombras realistas con luz artificial, la fuente de iluminación tiene que venir de una superficie, no de un solo punto de luz. La luz simulada que entra por una ventana es probable que sea más creíble espacialmente que un falso lucernario en el techo.

(5) La calidad de la iluminación artificial no puede coincidir exactamente con la luz natural, sin embargo no es necesario crear una simulación perfecta si con ello se puede simular todos los efectos perceptuales positivos.

(6) Hacer que la mente crea que está entrando luz natural a un espacio parece ser un resultado alcanzable. Como prueba tenemos el caso de la tecnología Coelux la cual ha conseguido este objetivo de manera satisfactoria.



5

Métodos experimentales de simulación

5.1 Fase de experimentación

5.2 Descripción de experimento

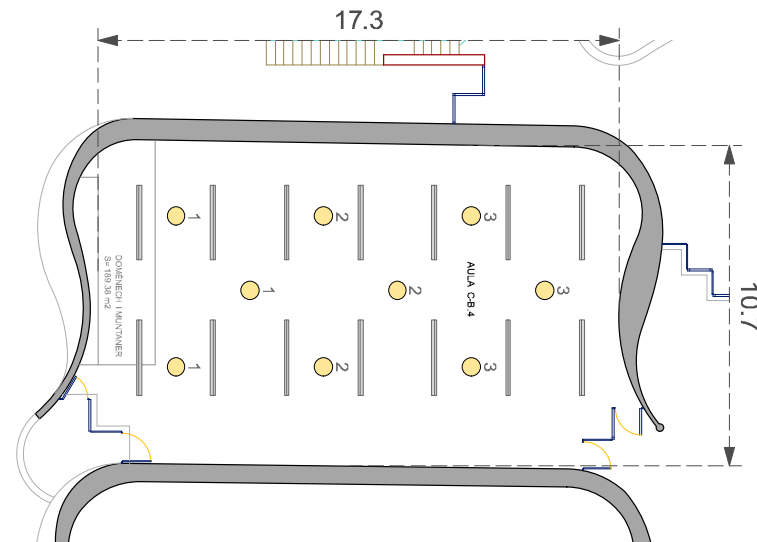
5.3 Encuestas

5.4 Resultados

5.5 Discusión de resultados

Métodos experimentales de simulación

Hipótesis de investigación



Imágen 50: Plano de Luminarias Aula CB-4 Etsab
Fuente: Direcció Etsab

Este estudio evalúa a través de encuestas el grado de fiabilidad de los parámetros perceptivos y de confort de fuentes de luz artificial que simulan la temperatura de color y el grado de iluminación producido por el Sol. Se ha utilizado una de las aulas de la ETSAB con conductos solares instalados (C-B1, C-B2, C-B3 y C-B4) y se han realizado encuestas a un mismo grupo de estudiantes.

Se analizan dos técnicas de simulación de la luz natural, una de forma natural y otra de forma artificial. Estas técnicas aumentan los grados de luz natural en el aula y las zonas que sufren de la falta de luz:

1. Uno de los dispositivos de iluminación natural que han sido evaluados implica un dispositivo de conducto solar que refleja la luz a través de un tubo de luz por encima del techo suspendido y luego redistribuye la luz en el aula.
2. Se utilizan lámparas biodinámicas programables que recrean la temperatura de color del Sol.

5.1 Fase de experimentación

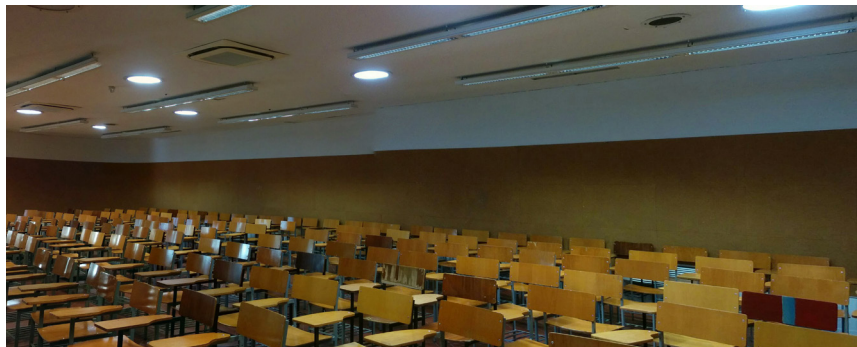


Imagen 51: Composición de Aulas iluminadas con conductos solares Etsab
Fuente: Autor

Evaluación del grado de fiabilidad de los parámetros perceptivos y de confort de una simulación artificial de luz natural.

Método de investigación

Espacio de ensayo y sistema de iluminación

El espacio se encuentra en el primer piso del edificio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Politécnica de Barcelona (ETSAB). Seleccionamos el Aula C-B4, por su distribución de conductos solares (DEPOSUN) de manera equilibrada en agrupaciones de tres. Realizamos una evaluación preliminar de la calidad de la iluminación existente en dicha aula para establecer los parámetros iniciales del estudio. Procedimos a encuestar a los estudiantes sobre la calidad de iluminación del aula ante esta fuente de iluminación para tomarla como base de comparación.

Las dimensiones del espacio eran 10.70 metros de ancho por 17.30 metros de profundidad y 2.60 metros de alto. Es un aula con ventanas en un extremo, protegida acústicamente tanto en paredes como en los techos suspendidos.



Imágen 52: Sistema Deplosun, conductos solares Etsab
Fuente: Autor



Imágen 53: Bombillas LIFx
Fuente: Autor

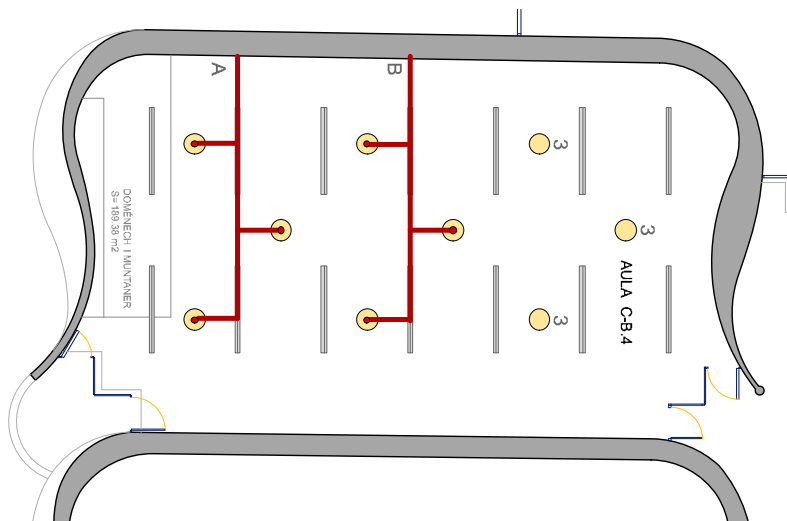
Se instalaron 6 lámparas biodinámicas de la marca LIFx, las cuales fueron donadas para realizar la experimentación en la escuela. Se colocaron en el interior de los conductos solares colgadas y fijadas de una barra de madera ubicada justo debajo de la compuerta del conducto.

El conducto puede ser abierto y cerrado de manera normal sin afectar la instalación realizada. La temperatura de color de las lámparas fue programada a 6500 K, correspondiente a un día soleado. Un controlador de iluminación en forma de aplicación para móvil Android realizada por la empresa LIFx fue utilizada para controlar la salida de luz de las lámparas y el apagado y el encendido de las mismas.

El objetivo principal del estudio es demostrar que la luz natural es capaz de ser simulada artificialmente sin afectar la percepción visual de los usuarios



Imágen 54: Preparación de conexiones a Bombillas LIFx
Fuente: Autor



Imágen 54: Circuitos en Paralelo planteados para la experimentación
Fuente: Autor

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural de una manera fiable y que a partir de aquí se pueda crear un prototipo de lámpara que realice la misma función de los conductos solares pero sin tener que realizar una intervención mayor en la estructura.

5.3 Elaboración de las encuestas

Cuestionarios generales y de respuesta visual ante la iluminación percibida.

Los cuestionarios fueron diseñados para recoger información sobre los participantes, como el género, la edad y preguntas relacionadas con las preferencias de los participantes de la luz del día, la luz eléctrica, y los niveles de iluminación, y su sensibilidad al deslumbramiento, y el color de la luz. Se evaluarán los parámetros de confort visual ante fuentes lumínicas naturales y artificiales. El método de evaluación utilizado será la escala de Likert.

Realizamos dos tipos de encuestas divididas en 2 días:

1. Día No.1, encuesta A en aula iluminada con luz natural mediante los conductos abiertos y luz artificial en forma de lámparas fluorescentes lineales ubicadas en el aula.

2. Día No.2, encuesta B en aula iluminada con bombillas biodinámicas LIFx con temperatura de color simulando la de un día soleado. (Temperaturas



Imágen 55: Secuencia de montaje de la fase experimental.
Fuente: Autor

de color: de 6500°K). Es importante destacar que el día No. 2 no se les especificó al grupo de estudiantes que la iluminación había sido cambiada, y así no se influenciaron los resultados de las encuestas.

Los índices de confort lumínico utilizados para valorar en las encuestas han sido:

1. Adecuación de los niveles de iluminación
2. Brillos, sombras y molestias ocasionadas
3. Deslumbramientos
4. Similitud de la luz artificial a la luz natural

Sujetos y pre-instrucción

Los sujetos fueron estudiantes de primer año de la carrera de Arquitectura de la ETSAB, la clase seleccionada fue la de Dibujo I del Prof. J. Lloveras; 52 sujetos participaron en la encuesta. Sus edades oscilaban entre 17 y 21 años. Ellos fueron preseleccionados con el fin de cumplir con los criterios requeridos de horario y actividad realizada en dos semanas consecutivas.

Se les explicó a los participantes la diferencia entre la luz natural y la luz artificial que se cuestiona en las encuestas, la mayoría desconocía que en el aula estaban instalados los conductos solares. En este

Encuesta de valoración de los parámetros de confort visual en el aula.

Según tu percepción general del grado de iluminación del aula, valora marcando de 1 (Totalmente en desacuerdo) a 4 (Totalmente de acuerdo) uno de los círculos de cada enunciado.

	1	2	3	4
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencia claramente.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. El brillo producido por los conductos solares no influye en tu percepción del espacio.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. Considero que la luz de los conductos solares se parece a la luz producida por el Sol.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. La iluminación sobre la superficie de estudio es adecuada.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de estudio.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6. La iluminación produce reflejos o deslumbramientos sobre la superficie de estudio.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8. Puedo diferenciar correctamente los colores.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
9. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz artificial.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
10. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz natural.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Escala de evaluación

(1) Totalmente en desacuerdo (2) En desacuerdo (3) De acuerdo (4) Totalmente de acuerdo.

Imagen 56: Modelo de encuestas utilizado para evaluar.

Fuente: Autor

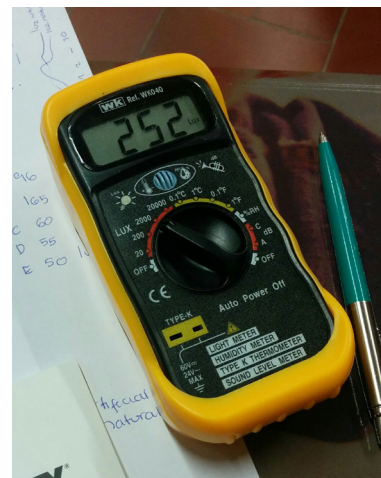
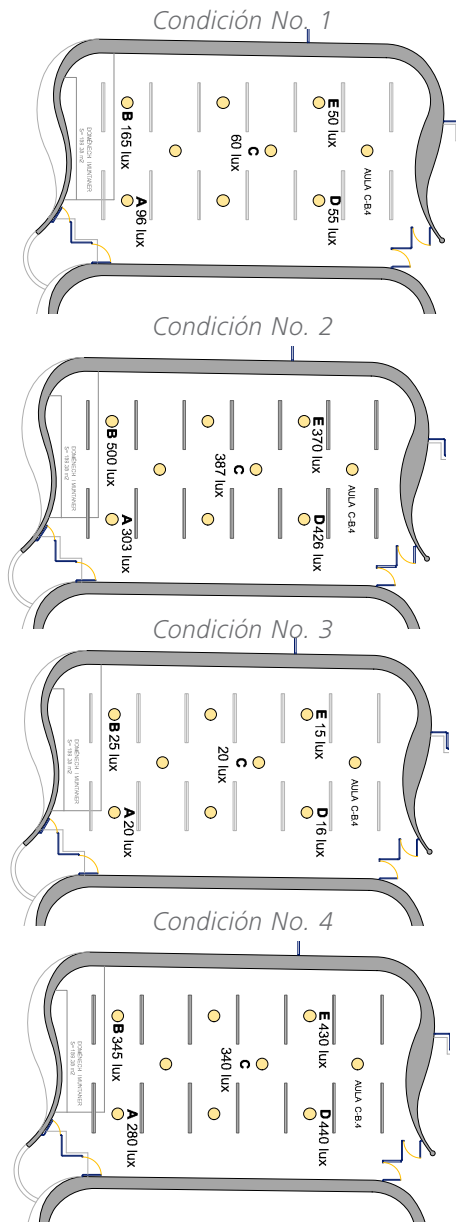


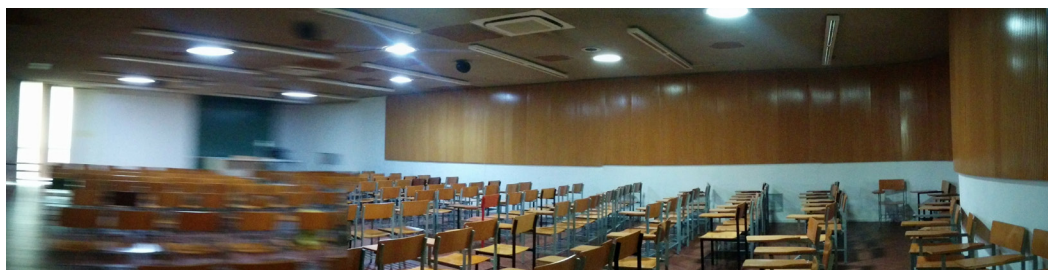
Imagen 57: Medidor utilizado.
Fuente: Autor

La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural procedimiento se les explicó acerca de la terminología de iluminación utilizada en los cuestionarios como molestia visual, y el deslumbramiento. Los participantes fueron informados de que los datos de la encuesta y sus respuestas a los cuestionarios serían tratados de manera totalmente confidencial, y que era permitido suspender la encuesta en cualquier momento si así lo deseaban. A continuación, se pidió a los participantes que completen los cuestionarios generales.

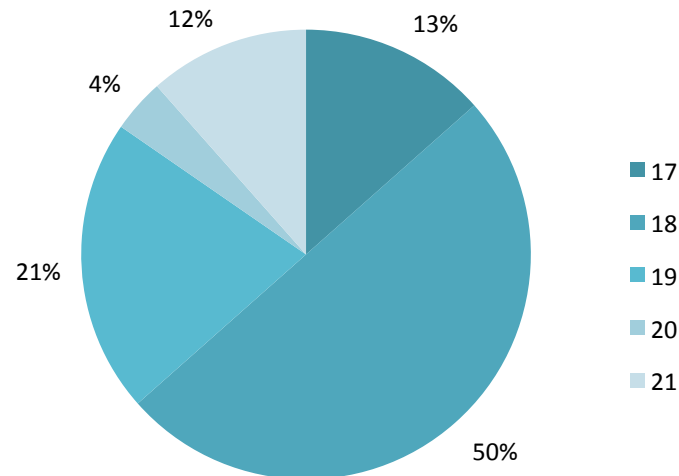
Monitoreo de datos de iluminancia

Se utilizó un medidor fabricado por Wisemann Klein para la medición de la iluminación. Se controlaron los niveles de iluminación en 5 puntos distribuidos en el aula. El intervalo de monitorización fue durante todas las condiciones de iluminación posibles en el aula:

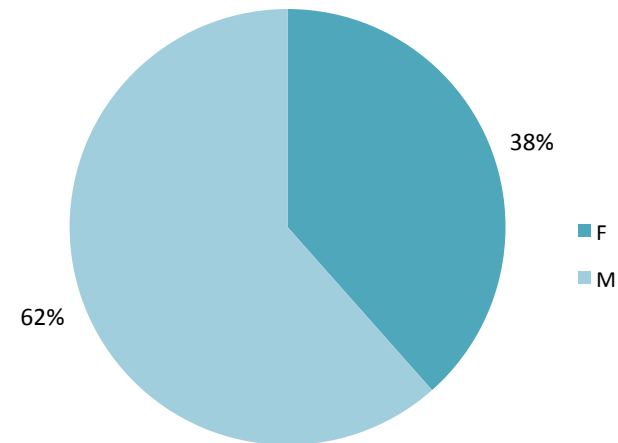
1. Condición No. 1: Seis entradas de luz natural a través de los conductos solares Deplosun.
2. Condición No. 2: Combinación de luz natural por medio de los conductos solares con luz artificial.
3. Condición No. 3: Luz natural simulada en el interior de los conductos solares.
4. Condición No.4: Combinación de luz natural simulada con luz artificial.

*Condición No. 1**Condición No. 2**Condición No. 3**Condición No. 4*

*Imagen 58: Condiciones de iluminación conseguidas.
Fuente: Autor*



Imágen 59: Edades de los participantes
Fuente: Autor



Imágen 60: Distribución de géneros de los participantes
Fuente: Autor

Características de los sujetos

Se encuestaron a 52 participantes en total dos veces en un total de dos semanas, 20 mujeres y 32 hombres, participaron en el estudio. Eran estudiantes universitarios de primer año de Arquitectura. Sus edades oscilaban entre 17 y 21. En general, el 84% de los sujetos eran menores de 20 años, y el 16% tenía entre 20 y 21. La media de la edad fue de 19.

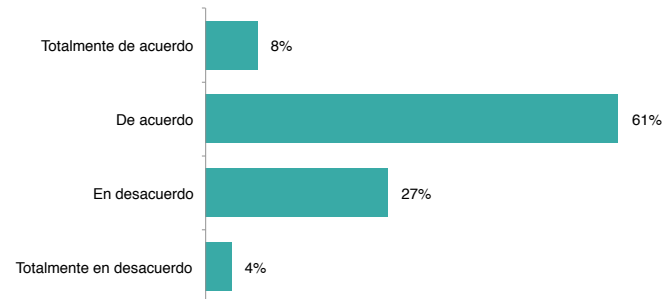
Estudio experimental No. 1: Luz natural combinada con luz artificial

Cantidad de participantes

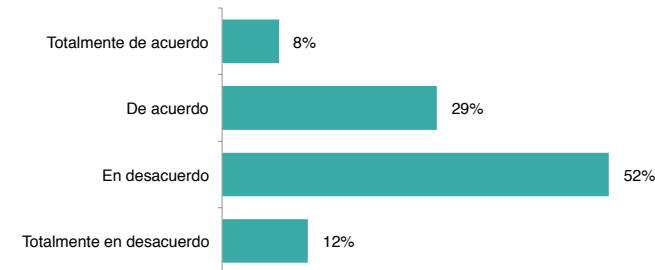
52

Preguntas	Respuestas				Por ciento			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencia claramente.	2	14	32	4	4%	27%	61%	8%
2. El brillo producido por los conductos solares no influye en tu percepción del espacio.	3	16	28	5	5%	31%	54%	10%
3. Considero que la luz de los conductos solares se parece a la luz producida por el Sol.	6	27	15	4	12%	52%	29%	8%
4. La iluminación sobre la superficie de estudio es adecuada.	2	13	30	7	4%	25%	58%	12%
5. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de estudio.	8	24	15	5	15%	46%	29%	10%
6. La iluminación produce reflejos o deslumbramientos sobre la superficie de estudio.	8	24	17	3	15%	46%	33%	6%
7. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.	5	19	19	9	10%	37%	37%	16%
8. Puedo diferenciar correctamente los colores.	1	6	32	13	2%	12%	61%	25%
9. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz artificial.	13	22	9	8	25%	42%	18%	15%
10. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz natural.	6	2	19	25	12%	4%	36%	48%

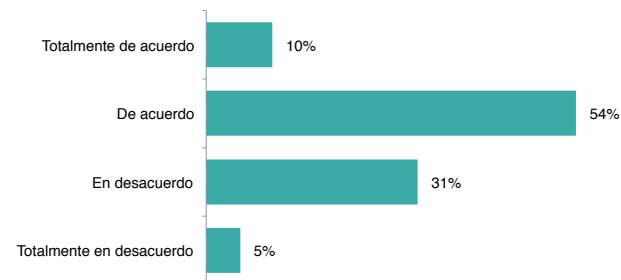
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencia claramente.



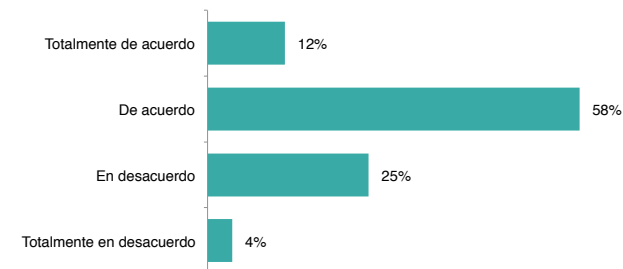
3. Considero que la luz de los conductos solares se parece a la luz producida por el Sol.

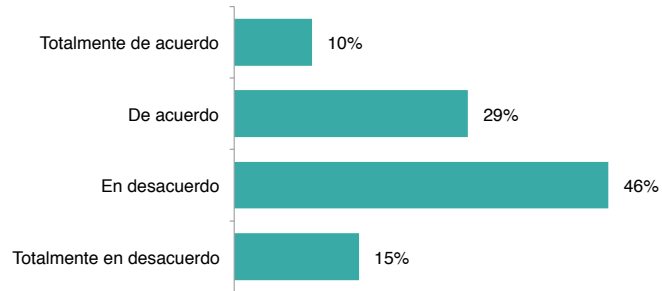
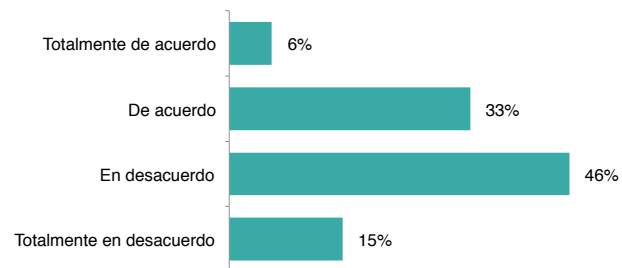
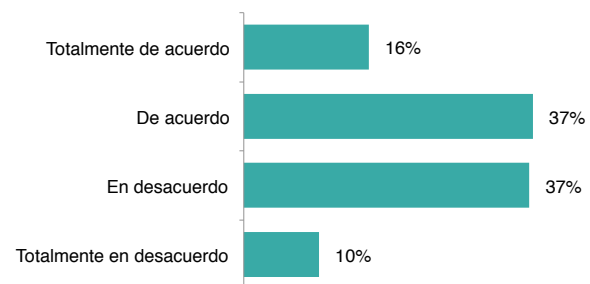


2. El brillo producido por los conductos solares no influye en tu percepción del espacio.



4. La iluminación sobre la superficie de estudio es adecuada.



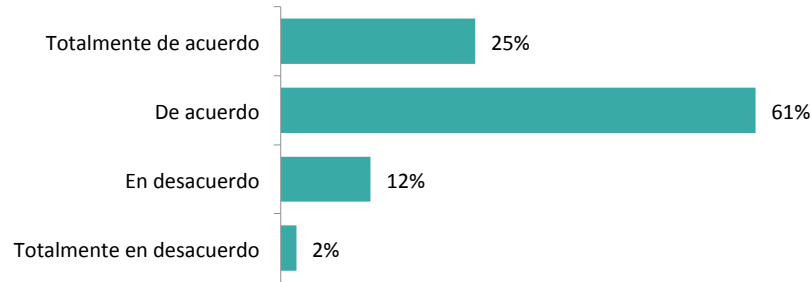
5. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de estudio.**6. La iluminación produce reflejos o deslumbramientos sobre la superficie de estudio.****7. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.****Respuestas en condiciones de iluminancia****Análisis de parámetros de confort visual**

Las respuestas medias de confort visual mostraron diferencias en dos condiciones de iluminancia de los dos estudios. En el primer estudio los sujetos consideraron que las condiciones de luz proporcionaron una buena satisfacción visual.

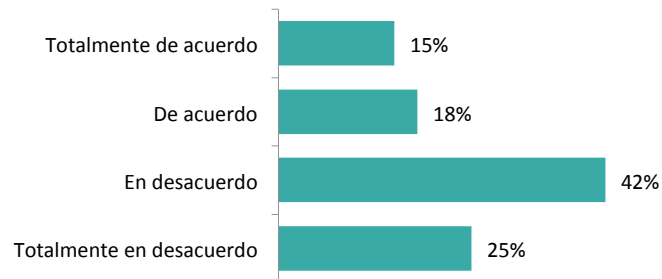
En el estudio experimental No.1, el 61% de los sujetos estaban de acuerdo con que la luz natural de los conductos solares se diferenciaba claramente de la luz artificial en el aula, a esto se le suma un 8% de los que estaban totalmente de acuerdo, en total un 69 % de los participantes afirmaban la diferencia. Este factor afecta el objetivo de querer lograr una simulación fiable de la luz natural en el experimento porque si ya se diferencian claramente, al cambiar esta luz y colocar luz artificial en su lugar se debe medir el grado de diferencia entre los dos.

De los sujetos, el 64% (10% totalmente de acuerdo y 54% de acuerdo) informó que el brillo producido por los conductos solares no influye sobre su percepción del espacio. Por su parte un total de un 64%(52% en desacuerdo y 12% totalmente en desacuerdo) de los sujetos consideran que la luz de los conductos solares no se parece a la luz producida por el sol. Afirman que esta luz al estar de manera difusa y concentrada en un punto les parecía diferente.

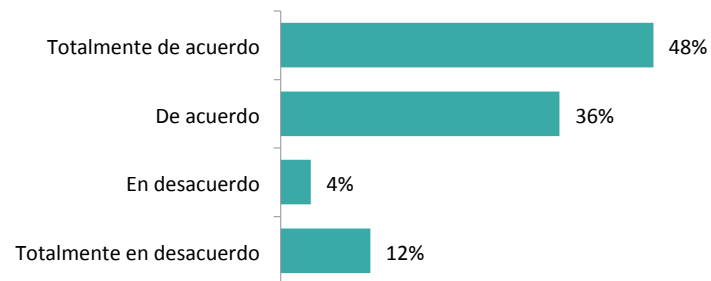
8. Puedo diferenciar correctamente los colores.



9. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz artificial.



10. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz natural.



La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

Un 70% (58% de acuerdo y un 12% totalmente de acuerdo) de los sujetos estuvieron de acuerdo en que la condición de iluminación era adecuada.

Observamos que un 61% (46% en desacuerdo y un 15% totalmente en desacuerdo) de los sujetos consideraban que el brillo de la luz no molestaba su espacio de trabajo. Un total de 61% (46% en desacuerdo y un 15% totalmente en desacuerdo) confirmaba que la iluminación que recibían no les producía reflejos o deslumbramientos sobre su superficie de estudio. Sin embargo en el factor de incidencias de sombras molestas sobre la superficie de trabajo, las respuestas fueron similares 53% de acuerdo y 47% en desacuerdo.

Un parámetro perceptual importante en la medición del confort visual es la correcta diferenciación de los colores. La evaluación indicó que un 86% (61% de acuerdo y un 25% totalmente de acuerdo) de los participantes diferenciaban correctamente los colores.

Se les cuestionó si tuvieran la oportunidad de regular la iluminación del aula si preferirían tener más luz artificial o más luz natural. En concreto, el 84% (36% de acuerdo y un 48% totalmente de acuerdo) de los sujetos prefiere aumentar la cantidad de luz natural en el aula, mientras que un 67% (42% en desacuerdo y un 25% totalmente en desacuerdo) rechaza la idea de aumentar la cantidad de iluminación artificial en las aulas, aquí el término de iluminación artificial se refiere a la iluminación de las lámparas fluorescentes.

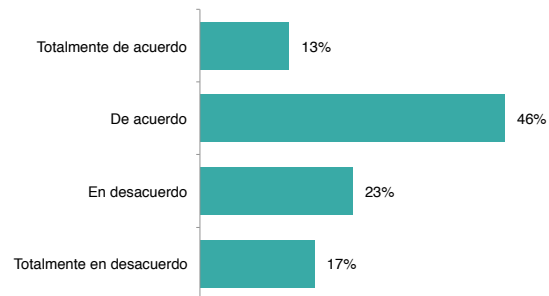
Estudio experimental No. 2: Luz natural simulada combinada con luz artificial

Cantidad de participantes

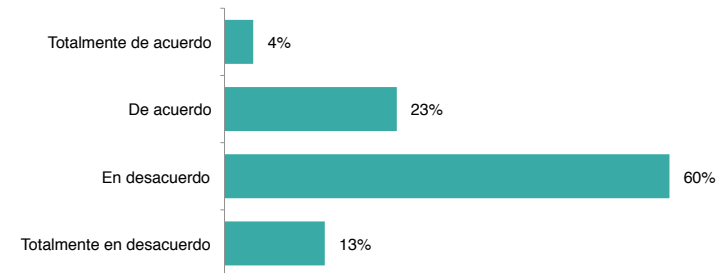
52

Preguntas	Respuestas				Por ciento			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencia claramente.	9	12	24	7	17%	23%	46%	13%
2. El brillo producido por los conductos solares no influye en tu percepción del espacio.	5	20	18	9	10%	38%	35%	17%
3. Considero que la luz de los conductos solares se parece a la luz producida por el Sol.	7	31	12	2	13%	60%	23%	4%
4. La iluminación sobre la superficie de estudio es adecuada.	1	10	34	7	2%	19%	65%	13%
5. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de estudio.	13	25	11	3	25%	48%	21%	6%
6. La iluminación produce reflejos o deslumbramientos sobre la superficie de estudio.	13	20	18	1	25%	38%	35%	2%
7. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.	9	17	19	7	17%	33%	37%	13%
8. Puedo diferenciar correctamente los colores.	4	4	25	19	8%	8%	48%	37%
9. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz artificial.	23	20	7	2	44%	38%	13%	4%
10. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz natural.	2	5	14	31	4%	10%	27%	60%

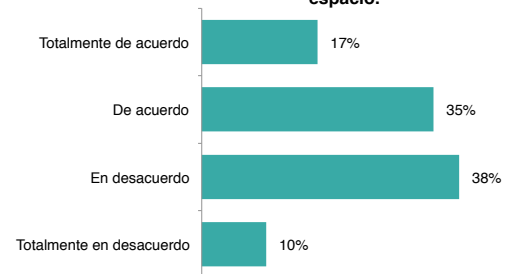
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencia claramente.



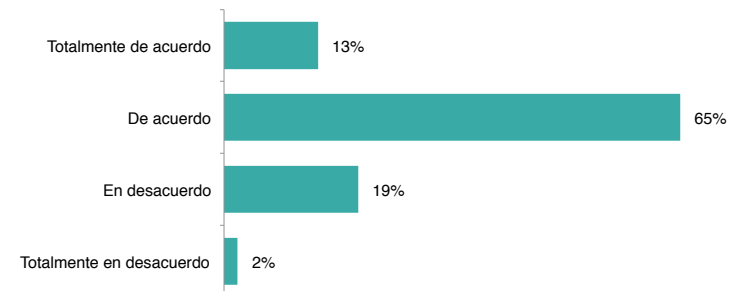
3. Considero que la luz de los conductos solares se parece a la luz producida por el Sol.



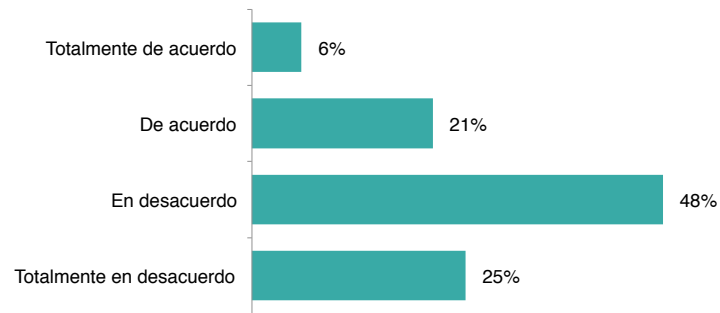
2. El brillo producido por los conductos solares no influye en tu percepción del espacio.



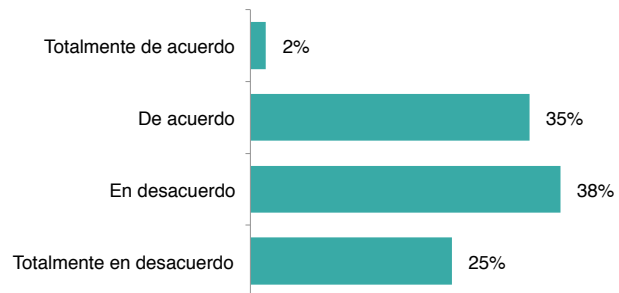
4. La iluminación sobre la superficie de estudio es adecuada.



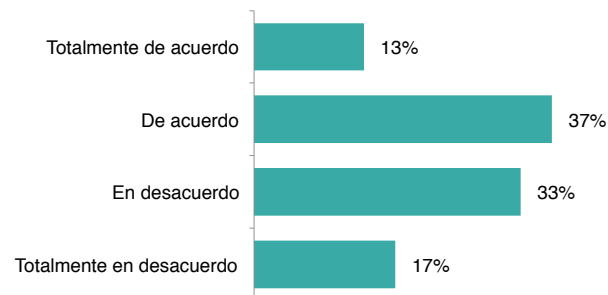
5. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de estudio.



6. La iluminación produce reflejos o deslumbramientos sobre la superficie de estudio.



7. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.



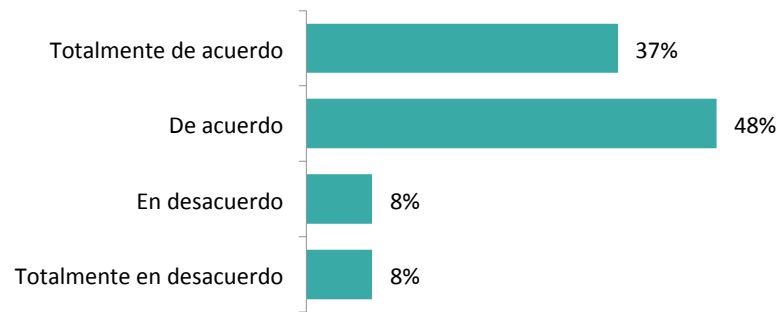
La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

El estudio experimental No. 2, utilizando luz natural simulada artificialmente a través de bombillas biodinámicas LIFx, observamos que el 46% de los sujetos afirmaron que diferenciaban claramente la luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula, un 13% estaba totalmente de acuerdo con esta diferencia, para un total de 59%. Comparado con el estudio No. 1 tenemos una diferencia de un 10%, pero esto no significa que la intención de simular la luz natural de manera artificial no sea fiable. Significa que debido a las condiciones del experimento, los resultados obtenidos según las condiciones en las que se encontraban las bombillas (muy cerca de las superficies difusoras) no fueron lo suficientemente convincentes para este 10% de los participantes que cambiaron de idea.

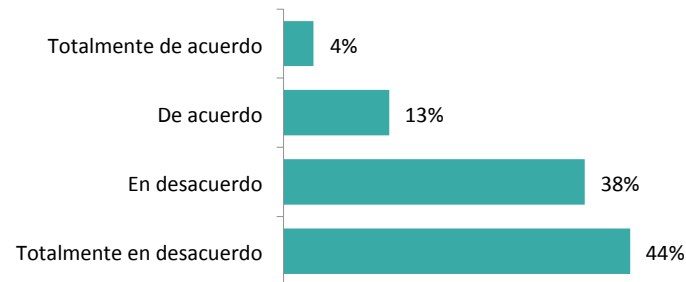
De los sujetos, el 52% (17% totalmente de acuerdo y 35% de acuerdo) informó que el brillo producido por los conductos solares no influye sobre su percepción del espacio, una diferencia de un 12% con respecto al estudio número 1. Por su parte un total de un 73% (60% en desacuerdo y 13% totalmente en desacuerdo) de los sujetos consideran que la luz de los conductos solares no se parece a la luz producida por el sol.

Un 78% (65% de acuerdo y un 13% totalmente de acuerdo) de los sujetos estuvieron de acuerdo en que la condición de iluminación era adecuada. Aquí notamos un aumento de un 8% en el grado de confort visual de los participantes con relación a las condiciones de iluminación del primer estudio.

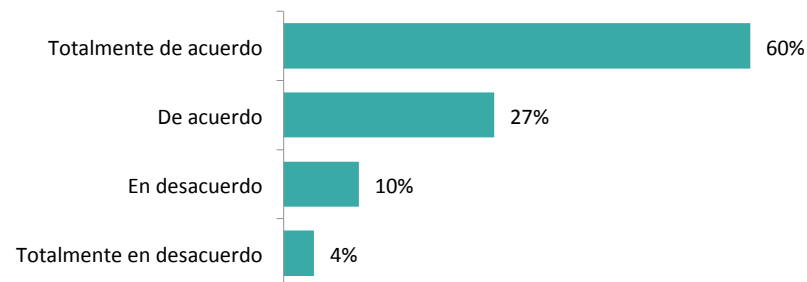
8. Puedo diferenciar correctamente los colores.



9. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz artificial.



10. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz natural.



La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural

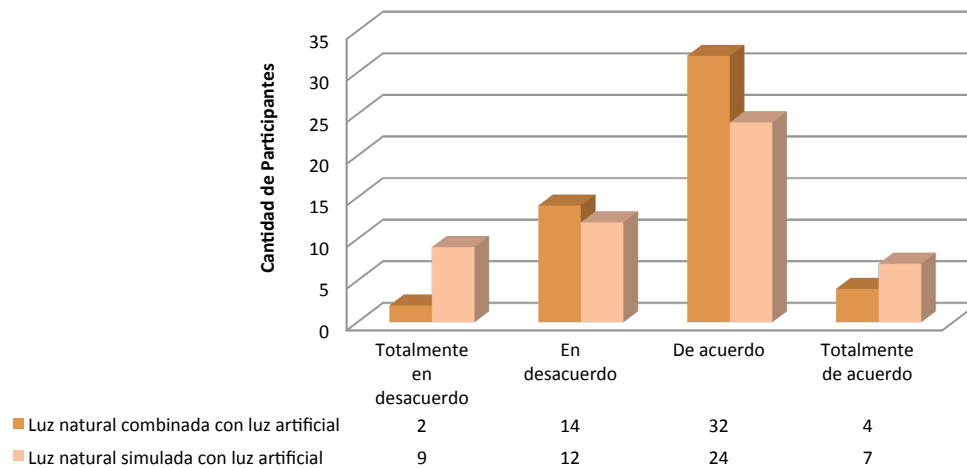
El 73% (48% en desacuerdo y un 25% totalmente en desacuerdo) de los sujetos consideraban que el brillo de la luz no molestaba su espacio de trabajo. Esto significa que bajo las condiciones simuladas y modificadas de iluminación del aula, el brillo no es molesto, cumpliendo con este parámetro de confort en cuestionamiento.

Un total de 63% (38% en desacuerdo y un 25% totalmente en desacuerdo) confirmaba que la iluminación que recibían no les producía reflejos o deslumbramientos sobre su superficie de estudio. Sin embargo en el factor de incidencias de sombras molestas sobre la superficie de trabajo, las respuestas fueron ligeramente similares al primer estudio, 50% de acuerdo y 50% en desacuerdo.

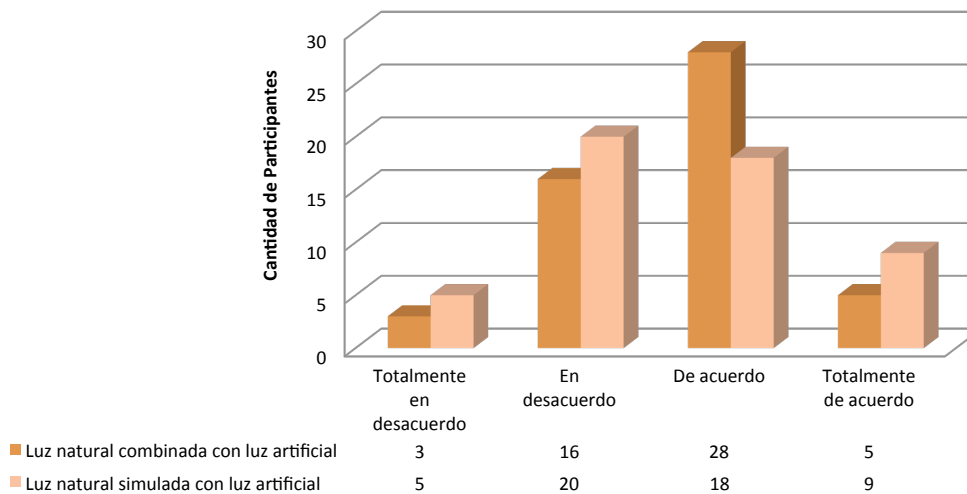
La evaluación indicó que un 85% (48% de acuerdo y un 37% totalmente de acuerdo) de los participantes diferenciaban correctamente los colores. Se les cuestionó si tuvieran la oportunidad de regular la iluminación del aula si preferirían tener más luz artificial o más luz natural. En concreto, el 87% (27% de acuerdo y un 60% totalmente de acuerdo) de los sujetos prefiere aumentar la cantidad de luz natural en el aula, mientras que un 82% (38% en desacuerdo y un 44% totalmente en desacuerdo) rechaza la idea de aumentar la cantidad de iluminación artificial en las aulas.

Las respuestas medias de la molestia visual y la comodidad fueron diferentes de acuerdo con los intervalos de cambio de las condiciones de

1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencia claramente.



2. El brillo producido por los conductos solares no influye en tu percepción del espacio.



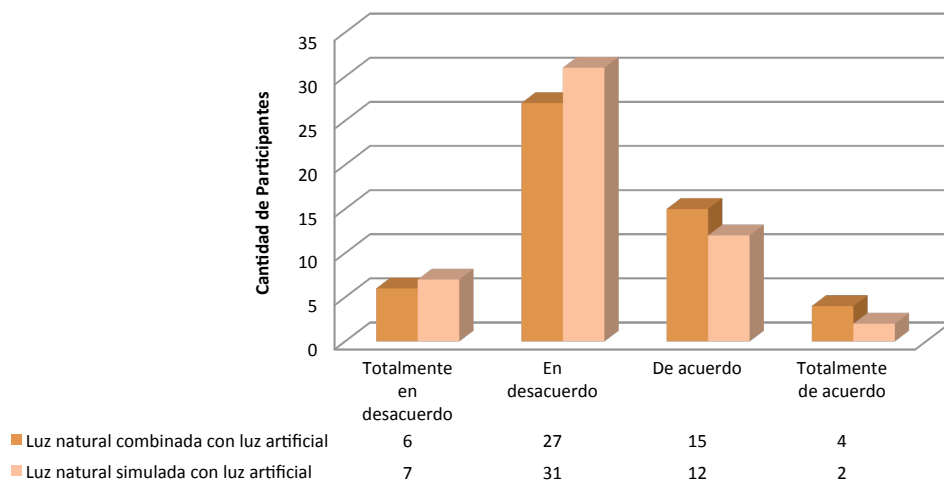
La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural iluminancia en el experimento 1 y en el 2. Bajo la condición 1, la sensación de molestia global no fue muy significativa. Bajo la condición 2, la sensación de molestia global aumentó ligeramente pero permanecía dentro de los rangos positivos de confort visual.

Discusión de resultados

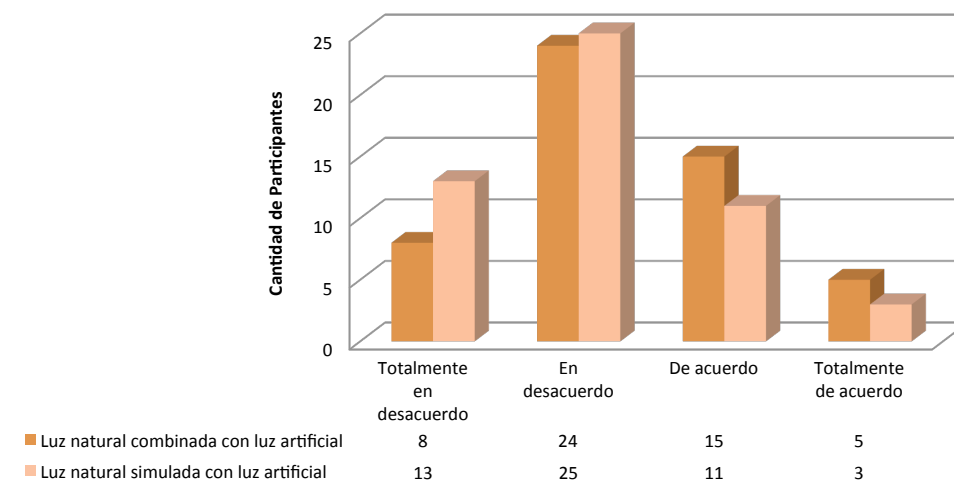
En ambos estudios los participantes diferenciaban claramente la luz natural recibida a través de los conductos solares y la luz artificial de las lámparas fluorescentes. En general los participantes están de acuerdo que la condición de iluminación en la superficie de estudio es adecuada. Esto se confirma porque cumple con los parámetros perceptivos del confort visual: distribución adecuada de las luminarias, ausencia de brillos, reflejos o deslumbramientos y la correcta diferenciación de los colores.

Los participantes consideraban que la luz en los conductos no se parecía a la luz natural producida por el Sol, en el segundo estudio la cantidad de participantes que la consideraban diferente aumentó ligeramente.

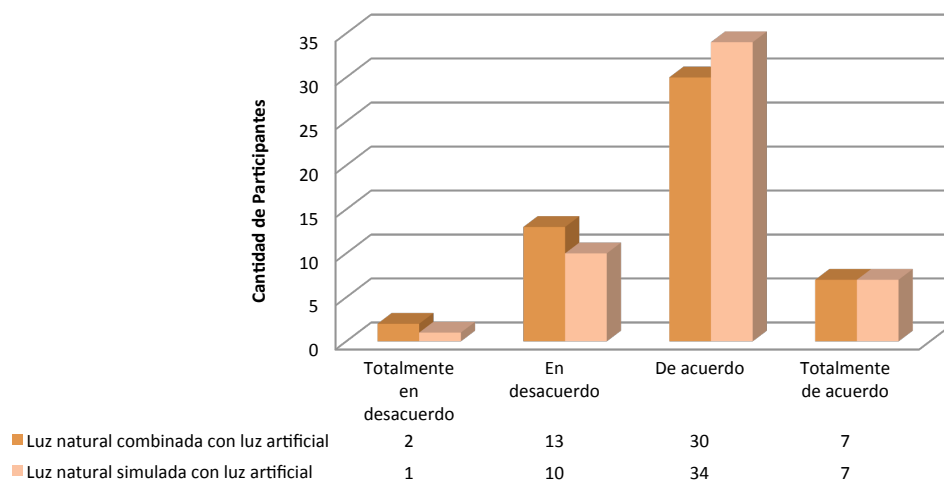
3. Considero que la luz de los conductos solares se parece a la luz producida por el Sol.



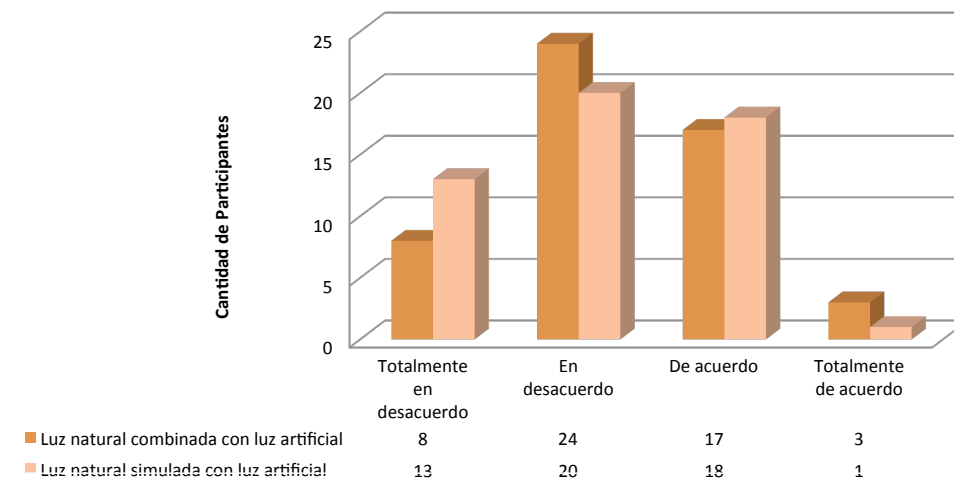
5. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de estudio.



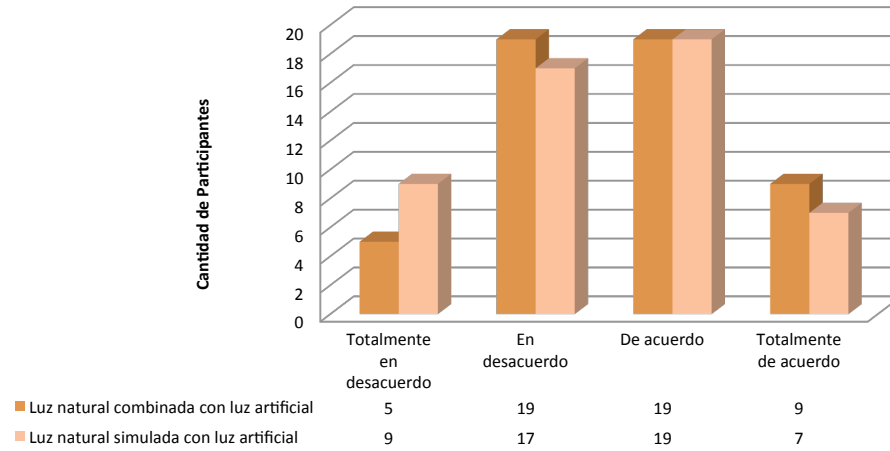
4. La iluminación sobre la superficie de estudio es adecuada.



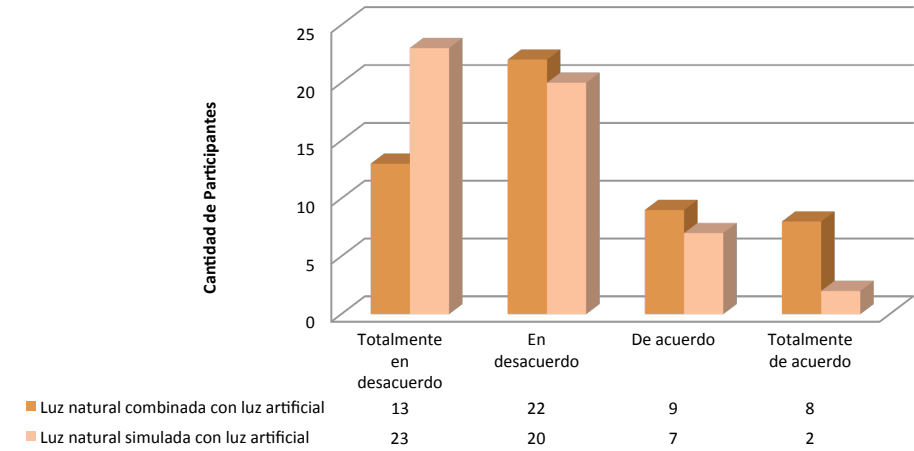
6. La iluminación produce reflejos o deslumbramientos sobre la superficie de estudio.



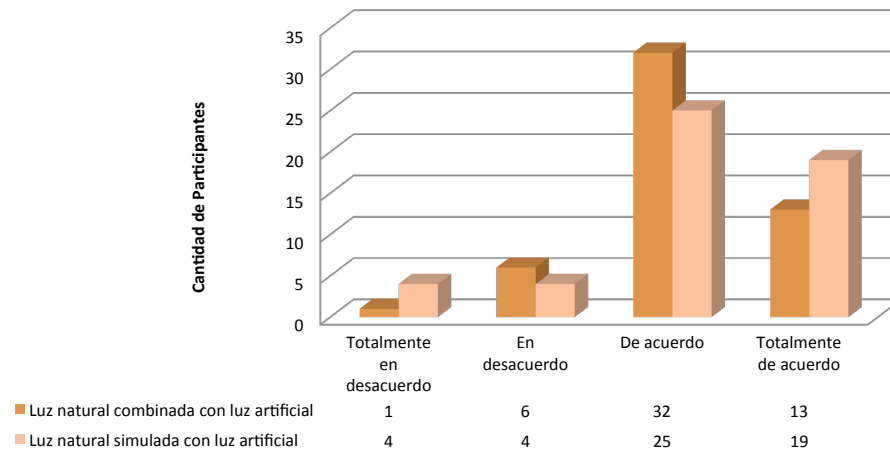
7. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.



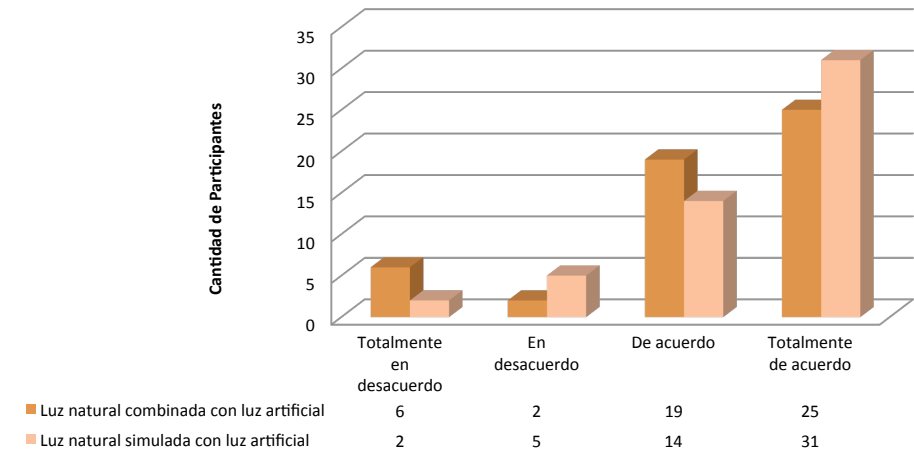
9. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz artificial.

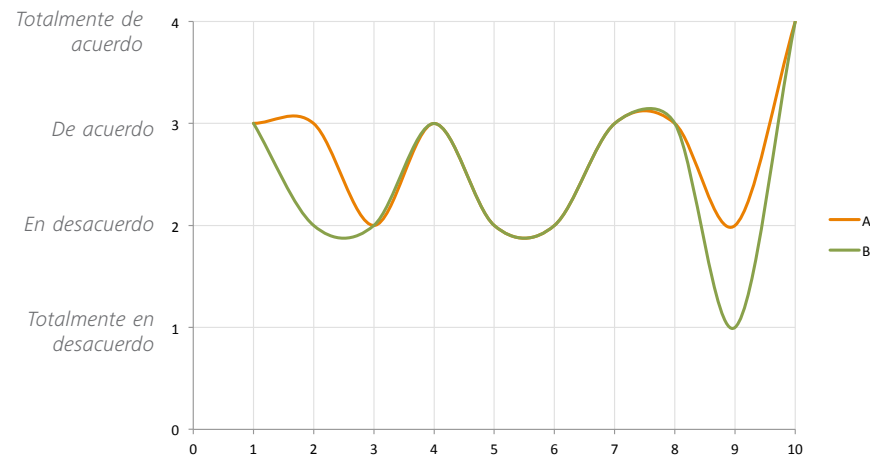


8. Puedo diferenciar correctamente los colores.



10. Si se pudiera regular la iluminación, preferiría tener más luz natural.





Imágen 61: Resumen general de resultados.

Fuente: Autor

La comparación general de las diez preguntas en ambos estudios nos muestra que los resultados son valores similares, con ligeras diferencias porcentuales. Confirmamos de esta manera que los parámetros perceptivos y de confort en ambas condiciones lumínicas son adecuados, y que la simulación de la luz natural por medio de bombillas biodinámicas LED tiene un grado de fiabilidad aceptable.

Futuras investigaciones

Es importante seguir trabajando bajo diferentes escenarios de control del efecto de las luminarias que simulan la luz natural variando ciertos parámetros de diseño de la propia luminaria. Sería útil en trabajos futuros realizar las pruebas con la distancia en la que se coloca la bombilla con respecto al difusor utilizado, para no delatar su presencia dentro de la lámpara.

Una posible aplicación de esta investigación debido a sus resultados sería estudiar un sistema que realice una lectura de la temperatura de color de la luz exterior y mediante un software le envíe una señal a las lámparas para que reproduzcan esa tonalidad. Si los niveles de iluminación son buenos podríamos hablar de un ahorro energético considerable suprimiendo la luz fluorescente necesaria para poder alcanzar los grados de confort mínimos.



6

Conclusión

6.1 Conclusiones

6.2 Referencias Bibliográficas

6.3 Anexos

Conclusiones

- (1) Como consecuencia de este estudio consideramos fiable dentro de los parámetros del confort visual la utilización de bombillas biodinámicas LED para poder simular el efecto conseguido a través de conductos solares y de esta manera reproducir la luz natural dentro de un espacio.
- (2) Las sensaciones perceptuales positivas de una simulación pueden ser lo suficientemente estimulantes que a la mente no le importe si lo que esta viendo no es real.
- (8) En la simulación de la luz natural, la ilusión conseguida de la luz natural del día puede ser tan importante como los niveles de iluminación reales.
- (9) El confort lumínico se alcanza cuando es posible ver los objetos dentro de un recinto sin provocar cansancio o molestia y en un ambiente de colores agradables para las personas

6.3 Referencias Bibliográficas

1. Erik Andre , Jutta schade , " Daylighting by Optical fiber " ,
Periodicals Paper, Department of Environmental Engineering , Lulea
University Of Technology , Division of water resources engineering , pp.
11-17 (2002).
2. Gro, Harlem Brundtland, " Brundtland Report " , pp. 43, Published in
(1987). Robbins Claude .L , " Daylighting Design & Analysis " , United
States , Van Nostrand Reinhold, New York, NY , pp. 3-188 (1985) .
3. Dr. Mohsen M. Aboulnaga , " Advanced Daylighting & Lighting
Technology For Sustainable Architecture Design " , Submitted as part
the promotion requirements for the title of professor in Architecture
& Sustainable Design , Department Of Architecture , College Of
Engineering , Cairo University , pp. 2-32 (2003).
4. Advanced Daylight Technologies For Sustainable Architectural Design
Lechner, N.M, " Introduction to daylighting part I , light forum", pp.
5-10,(2002).
5. Whitehouse, David, " Turning Night Into Day " , pp. 20 -25, (1999).
6. Ittenbach, Reitmair, "Systems Generating Systems", pp. 143, (2003).
7. Tregenza, P. and Loe, "The design of lighting", London, pp. 454-460,
(1998).
8. Boyce, PR, Veitch, JA, Newsham, GR, Myer, M., Hunter, C. (2003)
*Calidad de iluminación y de la oficina del trabajo: una simulación de
campo. Departamento de Energía de EE.UU.*

9. Goven T., Laike T., Pendse B., Sjöberg K. *La luminancia de fondo y el color Temperaturas Influencia en estado de alerta y Salud Mental. Iluminación nórdica, conferencia del diseño. Fagerhult. (2008)*
10. Hashmi, K. *La luz del día frente a la luz artificial. Informe Técnico 1999, la Agencia de Energía de Suecia. Departamento para la Gestión Sostenible. Eskilstuna, Suecia. (2006).*
11. Nakamura, H. *Influencia de la temperatura de color de la preferencia de la atmósfera, y de temperatura del aire. Universidad Setsunan. Japón (2009)*
12. Rea, MS. *Luz-mucho más que la visión. En quinto iluminación de Investigación Oficina de Investigación de iluminación. Simposio, Nueva York. Instituto Politécnico Rensselaer. (2002).*
13. Rea, M., Deng, L., Wolsey, R. *Fuentes de iluminación de espectro completo. Las respuestas de iluminación. Vol 7 (5) (2005)*
14. Szita, J. *El Iluminador - Daniel Rybakken hace algo más de luz que la mayoría de nosotros pensó siempre posible. Revista marco. V.82, pp. 210-217. (2011).*
15. *"Guía técnica para el aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios", Comité Español de Iluminación. (2005)*
16. *La representación de la luz natural en el proyecto arquitectónico. Autor: Edgar Alonso Meneses Bedoya, ETSAB noviembre 2015.*
17. *How To Simulate A Natural Daylight Environment Using Artificial Lighting. A Study on the Circadian Cycle and Ways to Control it by Light. Ida Moe Evensen. UK, London, 2013*

Fuentes Web

1. [http:// www.radiance-online.org](http://www.radiance-online.org) (12-9-2016).
2. [http:// www.Daylightinglab.com](http://www.Daylightinglab.com) (30-8-2016).
3. [http:// www. DOE High Performance Buildings.com](http://www.DOE_High_Performance_Buildings.com) (15-7-2016).
4. <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/> (20-7-2016).
5. [http://www. Energy Efficient Technologies: Daylighting Design](http://www.Energy_Efficient_Technologies:_Daylighting_Design). (20-7-2016).
6. http://www.construmatica.com/construpedia/L%C3%A1mpara_Incandescente(20-8-2016).
7. <http://www.monografias.com/trabajos/ergoluz/ergoluz.shtml#ixzz4LgGhpUSv>. (15-7-2016)
8. <https://hipertextual.com/archivo/2014/11/bombillas-inteligentes/> (2016)
9. <http://www.mediatrends.es/a/43653/bombillas-led-inteligentes/> (2016)
10. <http://www.neoteo.com/alba-la-primera-bombilla-inteligente-que-se-adapta-tu-entorno> (2016)
11. <http://www.lifx.com/pages/user-manual-spanish> (2016)
12. <http://www.lootech.com/coelux-el-tragaluz-artificial-que-imita-a-nuestra-atmosfera/> (2016)
13. <http://www.xatakaciencia.com/tecnologia/recreando-la-luz-natural-en-espacios-interiores> (2016)
14. Rybakken, D. (web) Sitio web del artista. Disponible en: <www.danielrybakken.com> [2016]

15. Licht.de Impacto de la luz en los seres humanos. Licht Wissen 19. [En línea] Disponible en: <www.licht.de> [2016]
16. Licht.de LED: luz del futuro. Licht Wissen 17. [En línea] Disponible en: <www.licht.de> [2016]
17. Iluminación Centro Recource (2009) iluminación de la educación en línea. Centro de Recursos para la Iluminación. Instituto Politécnico Rensselaer. [En línea] Disponible en: <<http://www.lrc.rpi.edu/education/learn-ING/>> [2016]
18. Lighting Research Center. Respuestas de iluminación. NLPIP. Vol. 7 (5). [En línea] Rensselaer Polytechnic Institute técnica. ESTADOS UNIDOS. Disponible en: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightingan-Swers/FULLSPECTRUM/abstract.asp>> [2016]
19. Osram. Luz en su tercera dimensión - los aspectos biológicos de diseño de iluminación para una mejor calidad de vida. [En línea] Disponible en: <http://www.osram.com.hk/osram_hk/EN/Local_Actividades/English_Catalog/Application_Quality_of_life.pdf> [2016]
20. http://www.archlighting.com/projects/experiments-in-light_o. (2016)